SCIENCES ET AVENIR
LES DOSSIERS

LES DOSSIERS

SCIENCES ET AVENIR

NUCLÉAIRE

éolien

hydrogène

électrique

HYDRAULIQUE

solaire

biogaz

QUELLES ÉNERGIES POUR DEMAIN ?

NUMÉRO SPÉCIAL 219 OCTOBRE/DÉCEMBRE 2024 - ALLEMAGNE 8.00 € / BELGIQUE : 6.10€ / GRÈCE : 6.20€ / ESPAGNE : 6.20 € / ITALIE : 6.20 € / DOM: 6.20€ / LUXEMBOURG : 6.10 € / PORTUGAL CONT : 6.20€ / TOM S: 860 XPF / TOM AVION : 1600 XPF / SUISSE: 9.80 CHF / TUNISIE : 10 TND / MAROC : 60 MAD / CANADA : 9.49 SCAD

GETTY IMAGES ET SPL/SUCRÉ SALÉ

NUCLÉAIRE

Mini-réacteurs, sels fondus, neutrons rapides… Les start-up françaises à la pointe de l'innovation

L 13667 - 219 H - F: 5,90 € - RD

SNCF VOYAGEURS

VOYAGEZ PLUS VITE EN POLLUANT MOINS

-95% DE CO_2

EN MOYENNE EN FRANCE ET VERS L'EUROPE*

RENDEZ-VOUS SUR LE SITE ET L'APPLICATION sncfconnect,
EN GARES, BOUTIQUES, AGENCES DE VOYAGES AGRÉÉES SNCF ET PAR TÉLÉPHONE.

DÉCOUVREZ L'ENGAGEMENT ENVIRONNEMENTAL SNCF SUR :
SNCF-VOYAGEURS.COM/FR/ DECOUVREZ-NOTRE-ENTREPRISE/SNCF-VOYAGEURS/ NOS-SOLUTIONS-DE-MOBILITE-VERTE

*Prendre le train à grande vitesse en France et vers l'Europe, c'est réduire de 95% en moyenne le CO2e émis pour un trajet équivalent, par la route ou par les airs. Source Base Carbone ADEME 2023 (bilans-ges.ademe.fr) et analyse comparative Carbone 4. Les émissions de gaz à effet de serre (GES) exprimées en CO2 équivalent (CO2e) du TGV sont calculées conformément au guide méthodologique de l'information GES des prestations de transport publié par l'Etat français et certifiées par les Commissaires aux Comptes. La méthodologie prend en compte les émissions liées à l'usage et à la fabrication et maintenance du véhicule.Elles sont rapportées au voyageur-kilomètre sur une valeur moyenne pour un trajet longue distance en France, en avion court-courrier et en voiture thermique, électrique longue distance France (contenant 2,2 passagers, taux d'occupation en voiture longue distance France établi par l'ADEME). TGV INOUI est une marque enregistrée de SNCF Voyageurs. Tous droits de reproduction réservés. SNCF Voyageurs, SA au capital social de 157 789 960 euros, inscrite au RCS de Bobigny sous le numéro 519 037 584 - 4, rue André Campra - CS20012 - 93212 Saint Denis Cedex. JLP0824. **ROSA PARIS**

TGV INOUI

Sommaire

AZUKI WAKASUGI/AP/SIPA

L'océan, eldorado des renouvelables P. 54

GETTY IMAGES

Pétrole : le sevrage est-il possible ? P. 18

PAUL LANGROCK/LAIF-REA

Biométhane : le gaz sans l'effet de serre P. 30

FRANCOIS LAURENS/HANS LUCAS

On n'est jamais si bien servi que par soi-même P. 74

GETTY IMAGES

Les trois défis de l'hydrogène
P. 42

5 **Édito**

6 RENCONTRE
Michel Colombier
« Il faut utiliser l'énergie totalement différemment »

10 REPÈRES
10 Qu'est-ce que l'énergie ?
12 Les fossiles résistent encore
14 Un futur énergétique à construire

16 OBJECTIF DÉCARBONATION
18 Pétrole : le sevrage est-il possible ?
23 Vers un monde tout électrique ?
26 Renouvelables : vers la fin de l'intermittence
30 Biométhane : le gaz sans l'effet de serre
32 Il n'y a pas qu'une façon d'imaginer la transition
35 Les réseaux à la merci du changement climatique
38 **INTERVIEW** **Sophie Dubuisson-Quellier**
« Une société bâtie sur la croissance peut-elle intégrer la sobriété ? »

40 LES TECHNOLOGIES DE LA TRANSITION
42 Les trois défis de l'hydrogène
46 **INTERVIEW** **Luc Bodineau**
« L'hydrogène n'est pas une énergie miracle, mais un bon outil de stockage »
47 Nucléaire modèle réduit : l'envol ?
52 Le solaire en quête de nouveaux espaces
54 L'océan, eldorado des renouvelables
60 Le transport à voile a le vent en poupe
62 Tout autour de nous, un gisement de milliwatts
65 **INTERVIEW** **Lydéric Bocquet**
« La start-up oblige à respecter le principe de réalisme économique »
66 Énergies de demain ou… de jamais ?
70 **INTERVIEW** **Jean-Baptiste Fressoz**
« Il faut critiquer la notion de transition, car elle empêche de réfléchir à ce qui fâche »

72 ET MOI, JE FAIS QUOI ?
74 On n'est jamais si bien servi que par soi-même
78 Économies d'énergie : les bons gestes pour réduire sa facture
82 **INTERVIEW** **Stéphane La Branche**
« Réduire sa facture, la première motivation de la sobriété énergétique »

RÊVER À NOUVEAU C'EST TOUT UN APPRENTISSAGE

Apprentis d'Auteuil aide chaque année plus de 40 000 jeunes[1] en difficulté à bâtir leur avenir.

Soutenez-nous sur www.apprentis-auteuil.org

APPRENTIS D'AUTEUIL

La confiance peut sauver l'avenir

(1) Selon le rapport d'activité Apprentis d'Auteuil 2023.

Agence Marcel - © Yann Le Pape

LES DOSSIERS
SCIENCES ET AVENIR

NUMÉRO SPÉCIAL
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
redaction@sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale
Dominique LEGLU 56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir
Mathieu NOWAK 56.38
Rédacteur en chef La Recherche
Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR 56.15

Rédaction en chef hors-série Vincent REA 56.35
avec Florence LEROY 56.36
Directrice artistique Thalia STANLEY 56.21
Photo-iconographie Andreina DE BEI
(rédactrice en chef adjointe) 56.31
Isabelle TIRANT 56.32
Documentation Astrid SAINT AUGUSTE 56.48
Ont collaboré à ce numéro :
Grégoire ADER, Bruno BOURGEOIS,
Loïc CHAUVEAU, Caroline DEPECKER,
Sylvain GUILBAUD, Sara de LACERDA,
Denis DELBECQ, Nicolas GUTIERREZ C.,
Jean-François HAÏT, Valérie HANDWEILER,
Sylvie NADIN, Éliane PATRIARCA,
Philippe PUISEUX, William ROWE-PIRRA,
Marie-Laure THÉODULE, Pierre VANDEGINSTE,
Agnès VERNET

Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires
75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @
mediaobs.com
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70
assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution Cédric AUBRY - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES
01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH
01.55.35.56.63

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication
Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Abonnements et anciens numéros : 01.55.56.71.48
45, avenue du Général Leclerc
60643 Chantilly Cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Les abonnements et réabonnements doivent être adressés à Sciences et Avenir, service Abonnement
45 avenue du Général Leclerc 60643, Chantilly Cedex.
Tél. : 01.55.56.71.48.
Tarif des abonnements : France,
1 an simple (12 numéros) : 35 €.
1 an complet (12 numéros + 4 hors-série) : 48 €.
Tarifs pour les pays étrangers sur demande.
Multimédia : Sciences et Avenir, 41 bis avenue Bosquet, 75007 Paris. Tél : 01.55.35.56.00.
Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec Sciences et Avenir, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement.
Copyright Sciences et Avenir.
Commission paritaire n° 0620K79712.
ISSN 2970-7420 Distribué par MLP.

PEFC 10-31-1557
Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
pefc-france.org

Origine du papier : Allemagne
Taux de fibres recyclées : 0%
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France Impression, certifié PEFC

ACPM DIFFUSION

Édito

GETTY IMAGES

Désintox

On connaît l'aphorisme : la meilleure énergie pour la planète, c'est celle qu'on n'utilise pas. Illustration par l'absurde : jamais autant de pétrole, de charbon et de gaz n'ont été consommés qu'en 2023 ! Une addiction dont les effets secondaires – les émissions de gaz à effet de serre, à leur pic elles aussi en 2023 – sont aussi mortifères que ceux d'une overdose. Car il n'y a nul besoin de médecin pour poser le diagnostic : oui, nous sommes accros aux énergies fossiles. Telle une drogue puissante s'écoulant dans les veines du toxicomane, l'énergie irrigue tous nos actes. Et sous peine de voir le monde devenir inhabitable, il nous faut nous désintoxiquer.

La bonne nouvelle, c'est que tout est encore possible. Il existe un chemin, certes étroit. Sans espérer un miracle technologique – les lois de la physique sont ce qu'elles sont ! Mais le temps est compté, trop pour le gaspiller avec des technologies au faible rendement, au bilan carbone désastreux ou au coût stratosphérique. Ne pas croire aux mirages, donc. L'hydrogène vert ? Les spécialistes restent prudents. Le captage de CO_2 ? Seuls quelques industriels y pensent encore. Des avions sillonnant le ciel, propulsés par des biocarburants à base de matières organiques ? Si l'on imagine en faire décoller autant qu'aujourd'hui, en France, les forêts du pays n'y suffiraient pas… Quant aux mini-réacteurs nucléaires pour lesquels des dizaines de start-up, notamment françaises, explorent de multiples voies, ils seront opérationnels en 2030, au mieux. Or c'est aujourd'hui que se décide le sort du climat. Les solutions techniques qui doivent rebattre les cartes, ne les attendons pas : elles sont là. Tout un éventail de technologies imparfaites, mais sans cesse améliorées, qui, mises ensemble, sont en mesure dès maintenant de dessiner un avenir énergétique crédible. Déjà, l'électrification du monde est en marche. Les énergies renouvelables se développent à toute vitesse, notamment en mer. Dans quelques années à peine, l'électricité qu'elles produiront sera disponible à la demande grâce à des batteries géantes, des interconnexions à l'échelle de l'Europe, une gestion optimisée du réseau – auquel, pourquoi pas, sera raccordée la batterie de votre voiture électrique.

Mais il ne faut pas attendre des technologies, quelles qu'elles soient, qu'elles nous permettent de rester bras croisés. Car les techniques sont l'expression de la société. Changer d'énergie, c'est changer de monde. Les modes de vie – et notre rapport à l'énergie en fait partie – ne sont pas décidés par les individus, nous rappelle la sociologue Sophie Dubuisson-Quellier : ils sont le fruit de politiques publiques, de décisions industrielles prises depuis des siècles, les unes entraînant les autres. Rénover notre maison, prendre moins l'avion, manger moins de viande ? La sobriété est indispensable, bien sûr. Mais insuffisante, et l'injonction individuelle au changement se révèle injuste et culpabilisante pour ceux qui n'ont guère le choix. Peut-être est-ce le vrai défi de la désintoxication : refaire du collectif, décider ensemble de l'avenir, à l'image de ce qu'avait fait la Convention citoyenne pour le climat. Changer notre façon d'habiter le monde. Tel un drogué, nous reculons à la pensée du manque. Sachant bien, pourtant, qu'une vie sans addiction ouvre des perspectives inconnues…

FLORENCE LEROY

Rencontre

MICHEL COLOMBIER

Ingénieur, économiste, cofondateur de l'IDDRI

« Il faut utiliser l'énergie totalement différemment »

La transition énergétique n'est pas qu'une affaire de nucléaire ou de renouvelables. Sortir du tout-pétrole induit rien de moins qu'un bouleversement des usages. Qui doit être orchestré par des politiques publiques convaincantes… et des dirigeants convaincus.

On parle de transition énergétique, mais on n'a jamais autant consommé de bois, de charbon, de pétrole…

Il faut regarder le monde tel qu'il est ! Quand on a commencé à discuter de climat, à peine un milliard d'humains avaient accès à la voiture, au chauffage, à l'électricité, aux ordinateurs. Aujourd'hui, il y a davantage de Chinois qui ont un mode de vie à l'européenne… que d'Européens. Et si la Chine produit et consomme du charbon en masse – tout en développant du renouvelable à grande échelle – c'est que sans cela, elle ne pourrait pas suivre le rythme de son développement.

Alors oui, sur les deux siècles écoulés, le bilan énergétique mondial se traduit par une courbe en hausse constante, avec le charbon, puis le pétrole, etc., qui s'installent chacun à leur tour. Toutes ces ressources s'empilent. C'est une première vision de l'histoire de l'énergie, celle d'une forme de conservatisme. Mais si vous vous intéressez non pas à la production, mais à la façon dont est consommée chacune de ces ressources, vous noterez que tout s'est modifié, et plusieurs fois. Le charbon, d'abord utilisé dans l'industrie, sert ensuite à faire uniquement de l'électricité, le gaz employé pour le chauffage devient source d'électricité, le pétrole qui servait à produire de l'électricité et de la chaleur devient à 80% du carburant…

La notion de transition est donc pertinente ?

La transition actuelle n'est pas la première à être voulue et organisée dans le monde de l'énergie. Lorsqu'après la Seconde Guerre mondiale, il a été décidé que l'électricité devait remplacer les énergies traditionnelles dans le monde rural, notamment pour la modernisation de l'agriculture etc., cette transition a été orchestrée. On a décidé, par exemple, de vendre l'électricité… au prix auquel les gens pouvaient l'acheter. Il y avait un possible technologique, et on s'en est emparé avec une vision non pas simplement technique, mais sociale ; et en mettant en place au service de cette vision des instruments économiques, politiques, réglementaires extrêmement sophistiqués. De même la fin du tout-pétrole dans les années 1970, avec la volonté de diversifier la production électrique. Pour moi, transition veut donc dire objectif normatif. Nous n'avions jamais eu, jusqu'à récemment, d'objectif visant à éliminer les sources émettrices de CO_2.

La différence, aujourd'hui, c'est qu'il faut mener cette transition au niveau mondial.

Rappelez-vous justement les chocs pétroliers des années 1970 : on découvre qu'il faut compter l'énergie, comprendre ce qu'on en fait, d'où elle vient, comment on peut remplacer le pétrole, et l'OCDE crée l'Agence Internationale de l'énergie (AIE) pour gérer la crise. On est bien là, déjà, dans une coopération internationale, et dans une forme de transition. Celle que nous avons devant nous est différente parce qu'elle est globale et que ses motivations sont autres, et d'abord environnementales.

> **« La transition que nous avons devant nous est différente des précédentes : elle est globale et ses motivations sont d'abord environnementales**

MICHEL COLOMBIER

Co-fondateur et directeur scientifique de l'Institut du développement durable et des relations internationales (Iddri), membre du Haut Conseil pour le climat, il travaille sur les interactions entre ressources, énergie et environnement, et enseigne à Sciences Po Paris. Il a également été président du Comité d'experts pour la transition énergétique (CETE), et membre du Comité de gouvernance de la Convention citoyenne pour le climat.

Mais comment envisager une transition mondiale entre des pays si différents ?

Le climat pose la question d'une transition radicale. Les délais se raccourcissent à mesure que l'on ne fait rien ; les tensions augmentent. Il est donc indispensable qu'une large majorité de pays s'impliquent sur la question environnementale. Et tant pis si quelques-uns refusent de suivre. Mais il faut tout autant que de larges zones du monde s'engagent dans la transition technologique et économique : étant donné les interconnexions, les dépendances de marché, de technologie, etc., si ce changement n'est pas global, ça ne marchera pas non plus.

Comment l'orchestrer ?

On a besoin d'une coordination internationale. C'est le rôle que peut assurer la discussion climatique, l'ONU, les COP. Celles-ci ne sont pas l'endroit où gérer les choix techniques – doit-on poursuivre le nucléaire ? En revanche, il est capital qu'un groupe de pays reprennent en termes politiques, à l'échelle mondiale, ce que disent les scientifiques.

Deuxième chose importante que fait la COP, et qu'elle fait bien : donner des perspectives communes, avec un certain nombre d'injonctions très globales mais partagées, et qui permettent ensuite de construire des coopérations autour d'objectifs à peu près clairs, d'organiser une pression politique des citoyens et des ONG, de mesurer les actions menées par les gouvernements.

Troisième fonction, essentielle elle aussi : créer un cadre de confiance. Car énormément de choses se négocient dans des cercles plus ou moins privés, où les États ne sont pas toujours présents. Si, dans chaque pays, ceux qui sont porteurs de la transition – ministères, organisations, mais aussi certains industriels qui y voient des opportunités – ne retirent pas de cette participation aux négociations multilatérales le sentiment qu'il y a un coup à jouer, il ne se passera rien. ◆◆◆

◆◆◆ **Quelles sont les technologies d'avenir, celles qui pourront vraiment être mises en œuvre ?**

Avant de s'intéresser aux technologies, il faut réanimer un autre débat, né lui aussi dans les années 1970 : quelles quantités d'énergie sont nécessaires pour faire fonctionner une société ? On se souvient de « la chasse au gaspi ». Mais ce type d'injonction a toujours eu un relent soit de « truc de gauche en mode décroissant » soit de « il faut se serrer la ceinture » – jusqu'à ce que la crise passe. Faire des politiques publiques sur ce point était considéré comme compliqué, peu légitime. Il était donc plus simple de gérer l'offre d'énergie que la demande.

Aujourd'hui, cependant, le plus compliqué, c'est moins cette offre – produire de l'électricité n'est pas l'enjeu majeur : on sait le faire – que la capacité à rebrasser les technologies de consommation : mettre de l'électricité là où il n'y en avait pas, du gaz là où il y avait du liquide, etc. Ce qui veut dire qu'on est obligé de s'atteler à faire des politiques jugées infaisables pendant trente ans ; et on le fait avec peu d'expérience et une efficacité moyenne. Le soutien à l'électrification du parc automobile, qui coûte très cher, est à cet égard assez mal ficelé… et mal vécu.

> **« C'est une erreur de croire que des technologies peuvent être mobilisées pour maintenir notre mode de vie »**

Revenons à la production d'énergie…

Dans cette organisation du changement, une question cruciale et complexe est celle de l'innovation et de ses fausses routes. Il y en a deux types : des choses qu'on n'arrivera jamais à faire dans les délais qui nous intéressent, comme la fusion nucléaire. Et d'autres qui, technologiquement, peuvent fonctionner, mais ne vont pas répondre au problème. Par exemple le captage de CO_2, c'est-à-dire le pari de dire : « On fait la même chose qu'avant, mais on rajoute un tuyau qui empêche que les émissions de CO_2 se retrouvent dans l'atmosphère. » On ne change rien… mais – manque de chance – on change quand même le prix, assez sérieusement. Et en changeant le prix assez sérieusement, en réalité, on change tout : le prix du chauffage, du transport, etc.

Et même s'il était vrai que le captage est capable de dimensionner la transition, il arrivera trop tard. Certains industriels s'accrochent à cette bouée pour sauver des parts de marché le plus longtemps possible, mais ils y croient à peine eux-mêmes et n'investissent pas, quand les renouvelables explosent.

Et l'hydrogène, n'est-il pas une clé de la transition ?

Bien sûr qu'on aura besoin d'hydrogène, notamment dans l'industrie. Mais si vous me dites qu'on va vendre de l'hydrogène en France pour mettre dans les chaudières, je ne vous croirai pas une seconde. Parce que ça n'a pas de sens d'un point de vue économique. On peut avoir aussi des carburants de synthèse, ou e-fuels, ou de la biomasse, mais pas à des niveaux de production répondant aux besoins du secteur aérien ou du transport routier, à cause des contraintes de biodiversité, d'adaptation agricole. Tout cela ne va donc pas remplacer les fossiles de façon indolore. Il y aura accumulation de différentes solutions. Et n'attendons pas de rupture majeure : on connaît les lois de la physique !

Les changements d'énergie vont-ils entraîner des changements d'usages ?

Si l'on prend les mêmes systèmes de demande et qu'on essaie d'y injecter nos hydrogènes, nos carburants synthétiques, ça ne va pas marcher. Partir en vacances au bout du monde pour 250 € hôtel compris, c'est terminé ! Mais concernant la vie quotidienne – se déplacer pour aller au travail, se chauffer, produire dans l'industrie, etc. –, on est face à des bouleversements profonds. C'est de ce côté-là qu'il y aura des difficultés, des enjeux sociaux. La transition est souvent ramenée à l'opposition nucléaire/renouvelables. En fait, c'est beaucoup plus compliqué : il s'agit d'utiliser l'énergie totalement différemment dans la société, de changer le rapport à son prix, à sa disponibilité, à sa distribution, à la nature de ce qu'on consomme, etc.

Et c'est là que nous nous trouvons face à un danger, car il est plus facile de faire croire qu'on peut réaliser une transition pratiquement invisible du côté du système industriel sans toucher aux organisations sociales – c'est la tentation de promouvoir les fausses solutions que nous avons évoquées. L'idée que des technologies peuvent être mobilisées pour éviter de changer notre mode de vie est une erreur fondamentale.

Vous disiez que produire de l'électricité n'est pas un problème ?

Aujourd'hui, en produire à partir des renouvelables revient moins cher qu'avec les méthodes traditionnelles. En revanche, il reste compliqué et coûteux de le faire à la demande, au moment où on en a besoin.

Le vrai problème, c'est le reste. Tous les technolâtres vous diront que le progrès permettra de faire des e-fuels. Mais un e-fuel, qu'est-ce que c'est ? C'est de l'électricité transformée en hydrogène qu'il faut recombiner avec du carbone issu de la biomasse ou extrait de l'air ambiant… À la fin, même avec des progrès techniques, le prix de ces carburants sera toujours bien au-dessus de celui du kérosène. C'est l'électricité qui va devenir le vecteur bon marché, et ce sont les molécules – aujourd'hui, le moins cher, c'est encore le fuel – qui vont être hors de prix. On ne peut pas faire rouler tous les camions au B100, un carburant « vert ».

On est en train de bouleverser radicalement les équilibres économiques. L'énergie devient plus chère, et pour tout. Il va falloir diminuer énormément les flux.

Y a-t-il des scénarios énergétiques crédibles conduisant à une baisse de la demande globale en énergie ?

À l'échelle mondiale, c'est compliqué : il y a encore beaucoup de pays où la consommation d'énergie, modeste, est appelée à croître. Pour les économies développées, la réponse est oui. Parce qu'on peut encore gagner en efficacité, ne serait-ce qu'avec, par exemple, la voiture électrique. Mais derrière le choix de la voiture électrique s'en cachent d'autres. Continue-t-on à faire des bolides de 2,5 tonnes parce qu'on prend comme modèle une voiture thermique de 1800 kilos à laquelle on rajoute des batteries ? Ou est-ce qu'on revient à des véhicules de 600 kilos, mais qui ne dépassent pas les 110 km/h ?

Un monde sans énergies fossiles est-il envisageable ?

Il y a sûrement un horizon, mais dire qu'il ne faut plus une goutte de pétrole en 2060 n'est d'aucune utilité politique. Ce qui peut changer la donne, c'est de faire comprendre à l'industrie du pétrole que dans vingt ou trente ans, son marché sera réduit de moitié du fait d'une baisse progressive de ses ventes orchestrée au niveau mondial. Le problème d'un industriel, ce sont les dix ans qui viennent. Il faut donc que les politiques publiques soient faites de telle sorte que ce moyen terme entre dans le cadre d'analyse de gens qui pensent d'abord à court terme.

Et il faut marteler le message sur la neutralité carbone à l'horizon 2050. C'est un attracteur qui fonctionne politiquement et permet d'articuler des décisions juridiques. Et cela va permettre de faire le tri dans les solutions techniques que nous avons entre les mains, que l'on sait évaluer, dont on connaît les difficultés. Parce qu'en 2050, on aura résolu notre problème… ou pas. Et cela se décide aujourd'hui.

> **« L'objectif de neutralité carbone en 2050 va permettre de faire le tri dans les solutions techniques que nous avons entre les mains**

Justement, comment vit-on en 2050 ?

Il y aura quelques impondérables. Cela suppose plutôt un monde dans lequel on prend moins l'avion que les classes moyennes supérieures des pays occidentaux aujourd'hui, mais les avions n'auront pas disparu. Moins de viande et de lait, mais certainement pas la fin de l'élevage, parce qu'on en a besoin pour la biodiversité... Ce n'est pas forcément de la décroissance, ni un retour en arrière, c'est une nouvelle frugalité.

Mais les comportements ont changé dans des proportions bien plus importantes entre la génération de nos parents et la nôtre ! Toute la question est donc dans la façon d'habiter ce monde qu'on va construire. La productivité va continuer à croître, libérant davantage de temps de loisir. On pourra faire deux, trois voyages en avion dans sa vie, mais aussi des trajets en train, en bateau – en prenant quelques jours pour aller de l'autre côté de l'Atlantique. Cela n'empêchera pas de découvrir le monde… La vie s'organisera différemment. Il y a tellement de choses à inventer en quarante ans !

Évidemment, on peut imaginer aussi un monde dans lequel seule une petite élite prendra l'avion et où les autres seront condamnés à rester dans leur région. La question est politique : quelle société on construit dans un cadre contraint, quels choix collectifs on fait sur la façon dont on mobilise les technologies.

La convention citoyenne sur le climat était un modèle de ce débat ?

J'ai fait partie du comité d'organisation, et j'ai trouvé fascinant la maturité progressive avec laquelle les citoyens se sont emparés de ces questions. Comment 150 personnes ont réussi à se mettre d'accord sur le 110 km/h sur autoroute alors qu'au départ elles étaient contre à 70 % ? Avant de rejeter cette mesure, il aurait fallu capitaliser sur le travail de ces 150 citoyens et mettre en débat plus largement les arguments échangés pour aboutir à cette proposition controversée. Tout n'a pas été réussi, mais cette convention reste quand même un modèle de délibération démocratique.

PROPOS RECUEILLIS PAR FLORENCE LEROY ET VINCENT REA

PHOTOS : BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

Qu'est-ce que l'énergie ?

Se nourrir, se vêtir, se chauffer, prendre la voiture ou rouler à vélo, envoyer des mails… l'énergie est partout ! Et comme seules les plantes sont capables de vivre de soleil, d'air et d'eau fraîche, nous devons recourir à différentes sources d'énergie pour rester en vie et transformer notre environnement. Revue de quelques informations indispensables.

Que la force soit avec toi !

Le terme vient du grec *energeia*, « la force en action ». Aujourd'hui, l'énergie désigne la capacité à effectuer des transformations. Dans l'Univers, elle se présente sous deux formes, atomique et cinétique (le mouvement). En physique, le terme est apparu au XVIIIe siècle, où il concerne alors uniquement le travail mécanique. Il se précise peu à peu jusqu'au XXe siècle, lorsque Einstein instaure une révolution en montrant que $E = Mc^2$: tout corps possède de l'énergie du seul fait qu'il possède de la masse. Et l'on peut transformer de l'énergie en masse, et réciproquement.

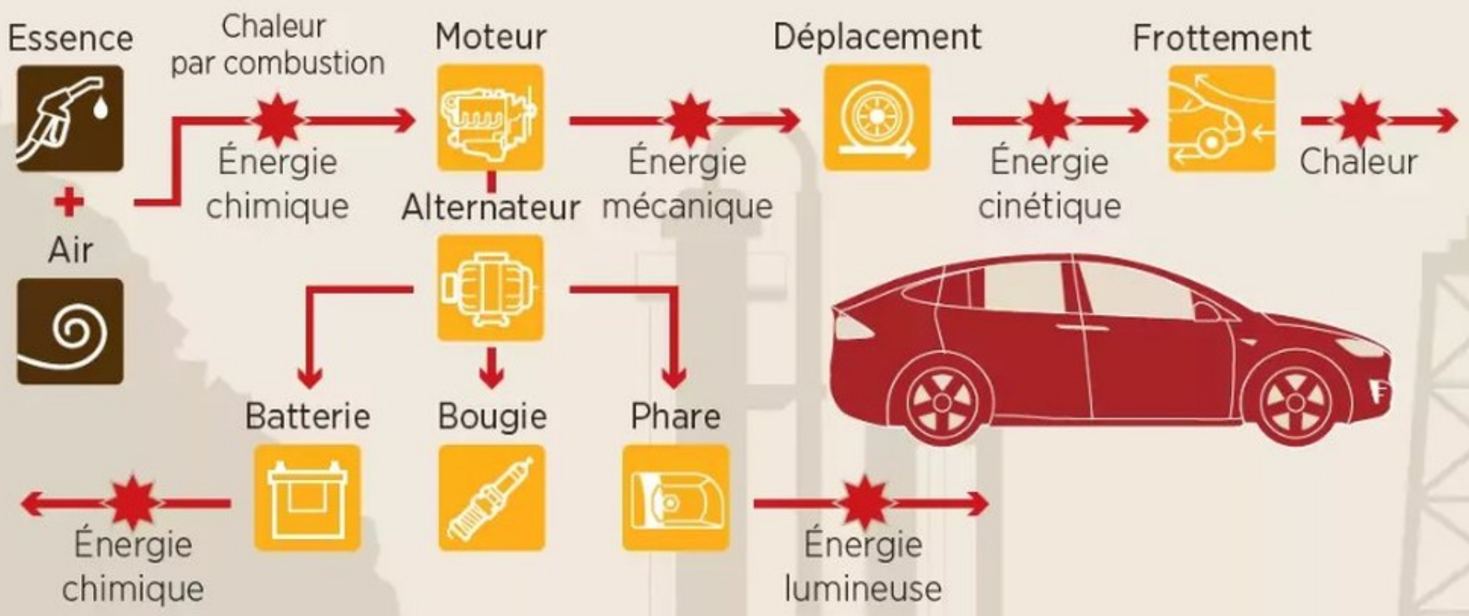
Sous toutes ses formes

Couramment, l'énergie se présente sous plusieurs formes :

- **Thermique,** générant de la chaleur
- **Électrique,** celle des électrons
- **Mécanique,** celle des objets que l'on déplace
- **Chimique,** liant les atomes dans les molécules
- **Lumineuse ou de rayonnement** qui génère de la lumière
- **Musculaire :** une molécule (ATP) fournit de l'énergie chimique aux fibres musculaires, qui se contractent et produisent un mouvement.

Rien ne se perd, tout se transforme !

Deux lois physiques régissent les multiples transformations de l'énergie.
a. Conservation On ne peut ni créer de l'énergie, ni la détruire. La quantité qui entre dans un système (ci-dessous, l'énergie chimique qui fait tourner un moteur) est égale à la quantité qui en sort, souvent sous une autre forme (ici sous forme de chaleur, de mouvement, de lumière).
b. Augmentation de l'entropie L'énergie a toujours tendance à se disperser.



Primaire, secondaire, finale…

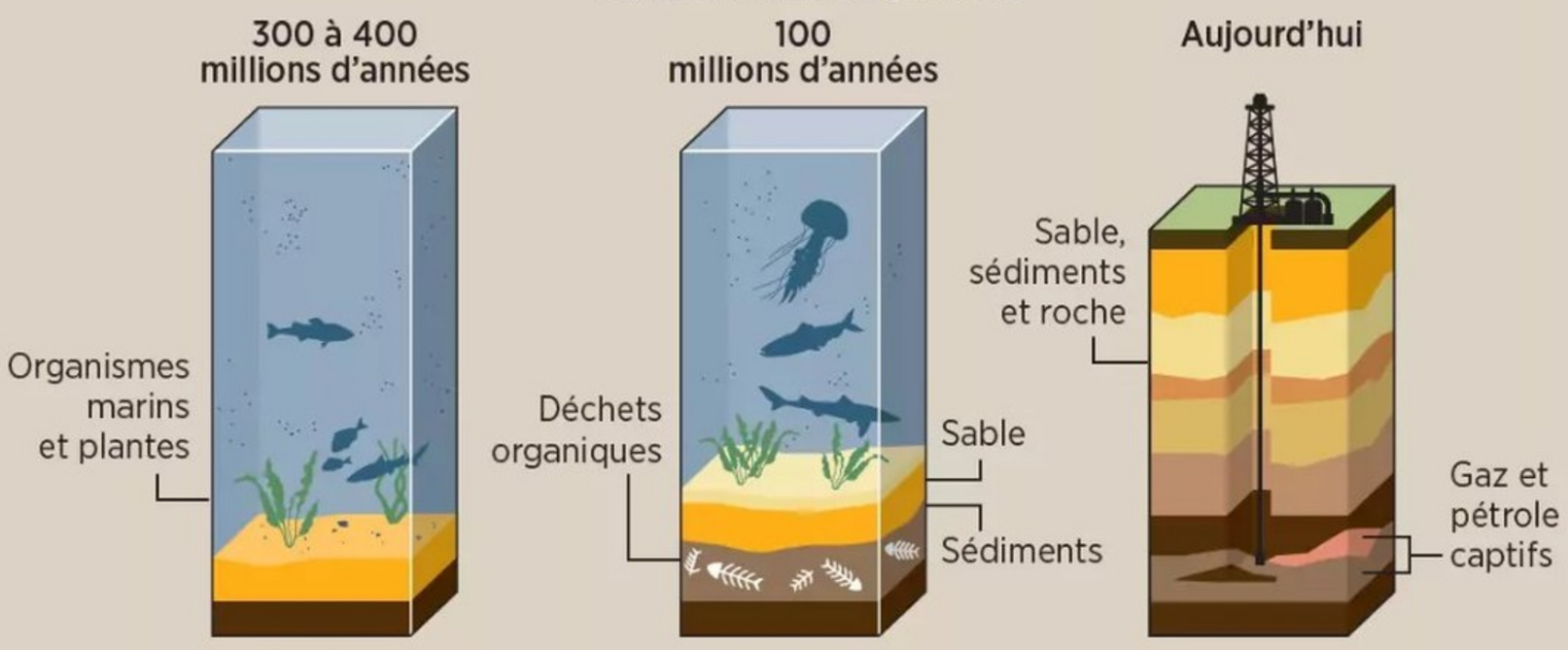
Énergie primaire : brute, non transformée, dont la source est dans l'environnement : soleil, eau, vent, pétrole, charbon, gaz, uranium…

Énergie secondaire : obtenue par la transformation d'une énergie primaire : l'électricité, l'essence… L'énergie utilisée par le consommateur est dite **finale**.

Les énergies non renouvelables

Elles proviennent de sources :
– fossiles, dont les stocks sont enterrés, résidus de processus de décomposition de végétaux et de matières organiques qui se sont déroulés sur des centaines de millions d'années *(voir l'infographie ci-contre).* Elles sont composées de carbone et d'hydrogène que l'on extrait sous forme gazeuse (méthane ou gaz naturel), liquide (pétrole) ou solide (charbon).
– nucléaire : localisée dans le noyau des atomes, notamment d'uranium, et exploitée par fission dans les centrales nucléaires.

La formation du pétrole



Pages réalisées par Florence Leroy
Infographies : Philippe Puiseux

À chaque usage son unité

L'unité de mesure de référence de l'énergie est le **joule (J)**, défini comme « le travail d'une force d'un newton (unité de mesure de la force) dont le point d'application se déplace d'un mètre dans la direction de la force ». Il représente l'énergie requise pour élever la température d'un gramme (un litre) d'air sec de 1 °C.
Le **watt (W)** est l'unité de puissance. Il équivaut à un joule par seconde. Multiples :
le kilowatt (kW), 10^3 W
le mégawatt (MW), 10^6 W
le gigawatt (GW), 10^9 W
le térawatt (TW), 10^{12} W
D'autres unités sont utilisées, notamment pour des domaines spécialisés.
En nutrition, la **calorie** :
1 kcal = 4,1855 joules ;
En physique, l'**électronvolt** :
1 eV = 1,602.10-^{19} j
Dans l'industrie et l'économie, la **tonne équivalent pétrole**, c'est-à-dire l'énergie moyenne d'une tonne de pétrole :
41 868 000 000 joules = 4,186.10^{10} J ou 7,33 barils de pétrole.
Une quantité d'énergie peut donc être un litre d'essence, des bûches, des pommes de terre…
Pour obtenir 1 kWh dans une usine hydroélectrique, il faut faire chuter 10 tonnes d'eau d'une hauteur de 40 mètres.

Faits et chiffres

▶ Si l'humain était capable d'utiliser toute l'énergie de la matière, il en suffirait de 5 tonnes pour alimenter l'ensemble de la population de la Terre en énergie pendant un an.

▶ Un bon repas fournit 1 kWh.

▶ Il faudrait 77 personnes pédalant 8 heures sur un système sans pertes pour chauffer pendant une journée un logement moyen, produire eau chaude et électricité.

▶ Un réservoir d'essence de 409 litres représente plus de 40 mois de travail d'un être humain.

▶ D'après l'ingénieur Jean-Marc Jancovici, un Français moyen dispose de l'équivalent énergétique d'environ 500 humains.

**▶ « Je crois en une vie après la mort, tout simplement parce que l'énergie ne peut pas mourir ; elle circule, se transforme et ne s'arrête jamais. »
Albert Einstein**

**▶ « Celui qui croit en une croissance infinie dans un monde fini est soit un fou, soit un économiste »
Einstein, encore.**

▶ En 1780, le chimiste Lavoisier dispose de semelles chauffantes, remplies d'eau chaude à l'instar d'une bouillotte.

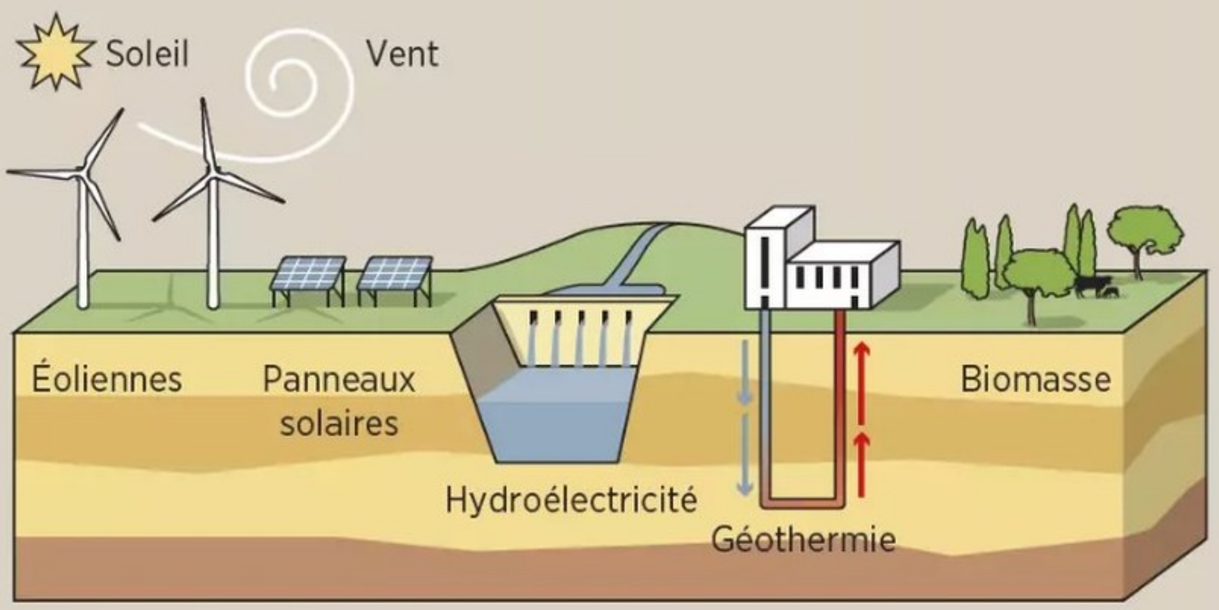
Quelle quantité de matière contient 1 kWh d'énergie ? Que peut-on faire avec 1 kWh ?

Énergie et puissance, attention aux confusions !

La puissance correspond à la vitesse à laquelle l'énergie est délivrée. Elle se mesure en **watts** (W). Pour faire bouillir un litre d'eau, un feu de bois et une bougie devront délivrer autant d'énergie. Mais le feu de bois le fera plus rapidement, il est donc plus puissant. Un watt est la puissance d'une machine qui fournit un joule toutes les secondes. Un **wattheure** (Wh) correspond à l'énergie fournie en une heure par une machine d'un watt.

Les énergies renouvelables

L'énergie du **vent** ou du **soleil**, qui peut être transformée en électricité par des éoliennes ou des panneaux solaires, est inépuisable. Tout comme la force de l'**eau** (hydroélectricité). La **chaleur** générée à l'intérieur même de la Terre peut être exploitée, par forage, notamment pour chauffer des habitations. C'est la géothermie. Et l'énergie emmagasinée par les **matières organiques** d'origine végétale comme le bois, animale, bactérienne ou fongique – la biomasse – peut être brûlée pour produire de l'électricité.



SOURCES : ŒA, TRANSITION ÉNERGÉTIQUE DE BRETRAND CASSORE/ DE BOECK,

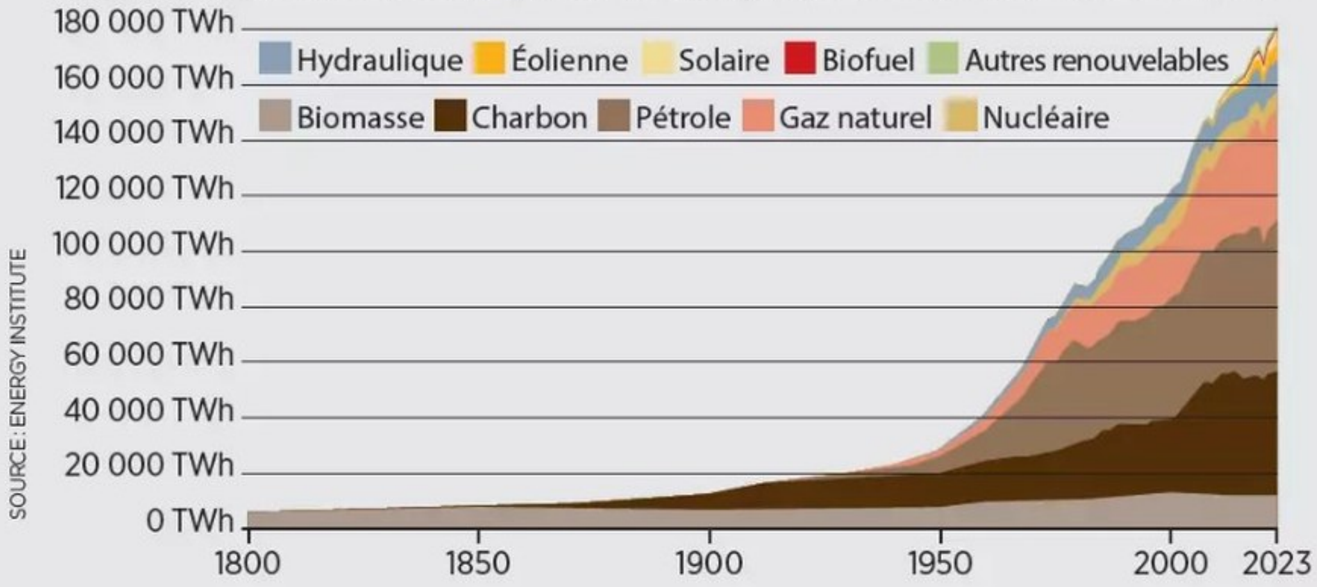
Les fossiles résistent encore

La production et la consommation mondiales d'énergie primaire ont atteint des records en 2023, avec une croissance de près de 2% par rapport à 2022. Pour le plus grand mal de la planète, car elles sont largement dominées – à plus de 80 % ! – par les énergies fossiles et leurs émissions de gaz à effet de serre (GES).

L'irrésistible ascension des hydrocarbures...

Deuis 1800, toutes les énergies ont crû et se sont accumulées.

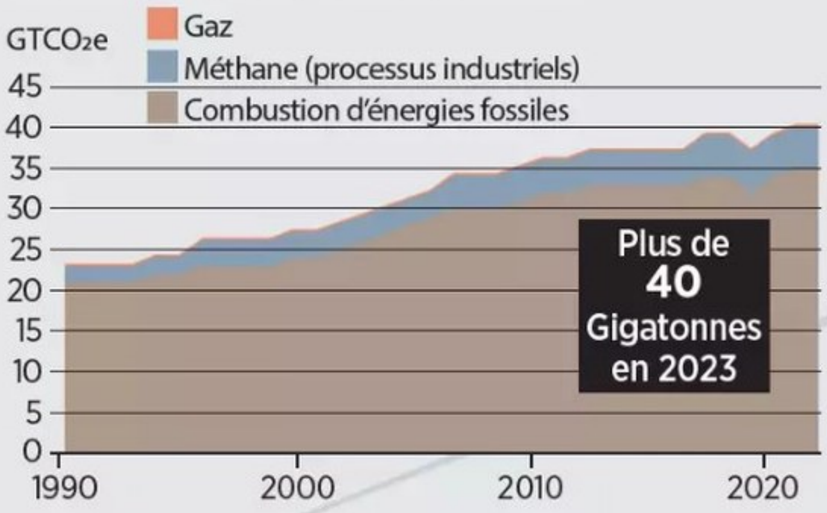
Évolution de la consommation d'énergie par source de 1800 à 2023



... et ses conséquences

Plus de 40 milliards de tonnes d'équivalent CO_2 : les émissions de GES ont atteint un nouveau seuil.

Évolution des émissions de GES

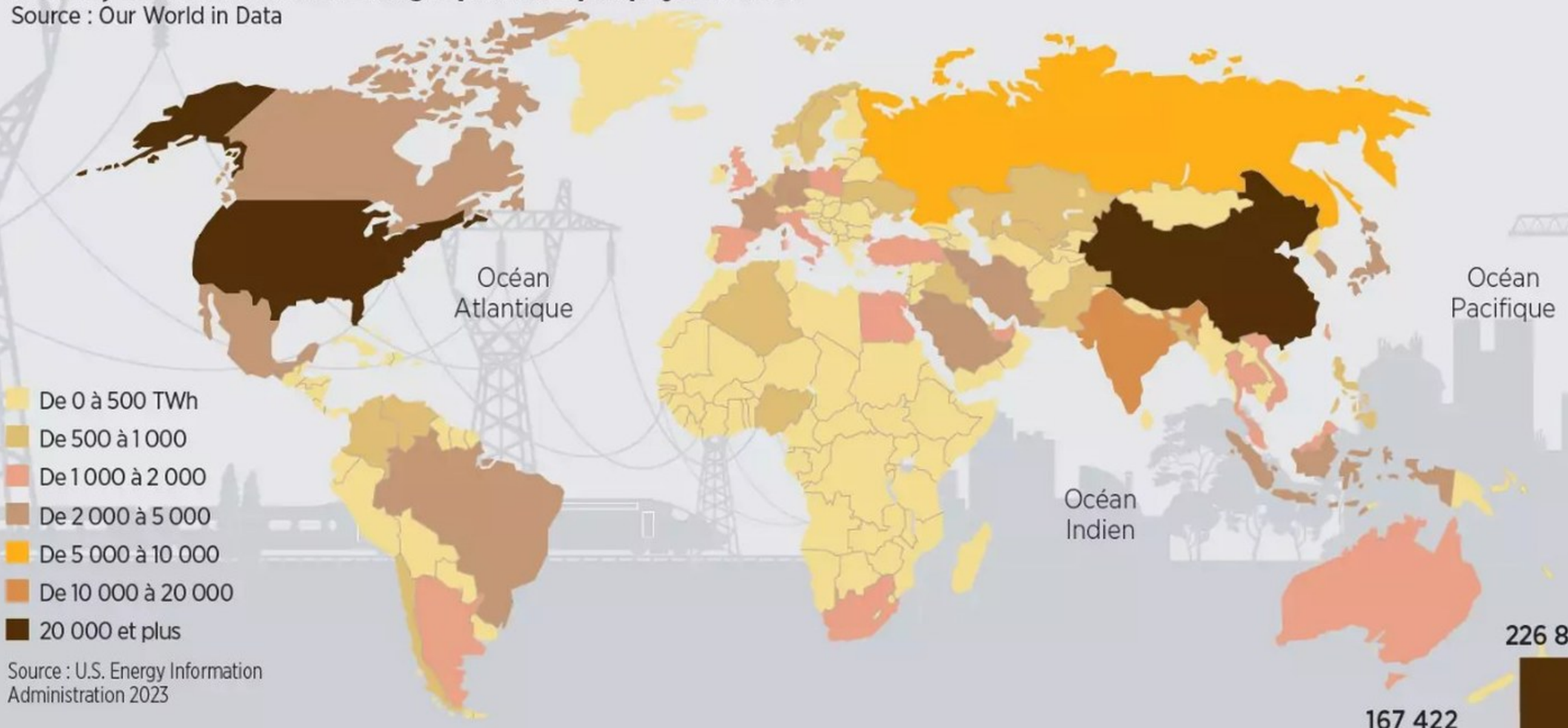


Un monde inégal

La consommation d'énergie primaire a baissé en Europe en 2023 (-2,2 %), tandis que celle de l'Asie-Pacifique a augmenté de 5 %. La Chine compte pour plus d'un quart de la consommation mondiale. La consommation d'énergie par habitant a également crû, avec des différences très fortes entre régions du monde.

Monde, consommation d'énergie primaire par pays en 2023

Source : Our World in Data

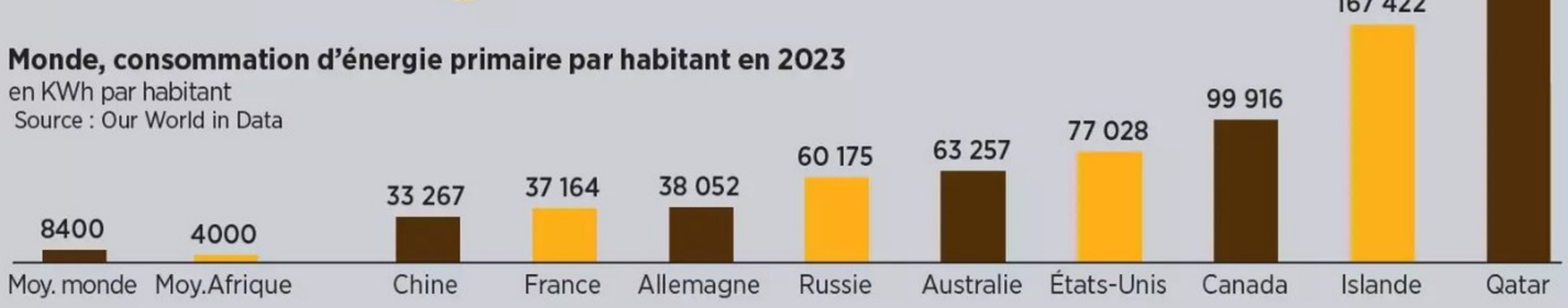


Source : U.S. Energy Information Administration 2023

Monde, consommation d'énergie primaire par habitant en 2023

en KWh par habitant

Source : Our World in Data



La décarbonation en marche ?

En 2023, les énergies fossiles ont encore compté pour près de 81 % de la consommation d'énergie primaire dans le monde (la première étant le charbon, 35,8 %). Cela, malgré un déploiement accéléré des énergies renouvelables : le solaire a ainsi progressé de 24 %. Mais sa part reste faible.

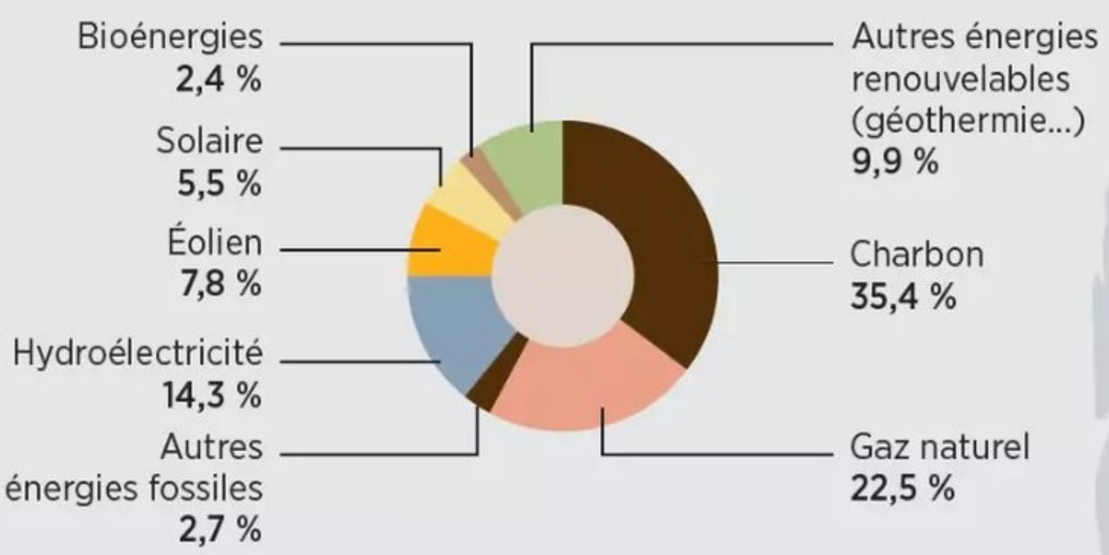
Au niveau mondial, une électricité toujours très carbonée

La production d'électricité est encore tributaire à environ 60 % des énergies fossiles. Elle a augmenté de 2,5 % par rapport à 2022, soit davantage que la production mondiale dans son ensemble

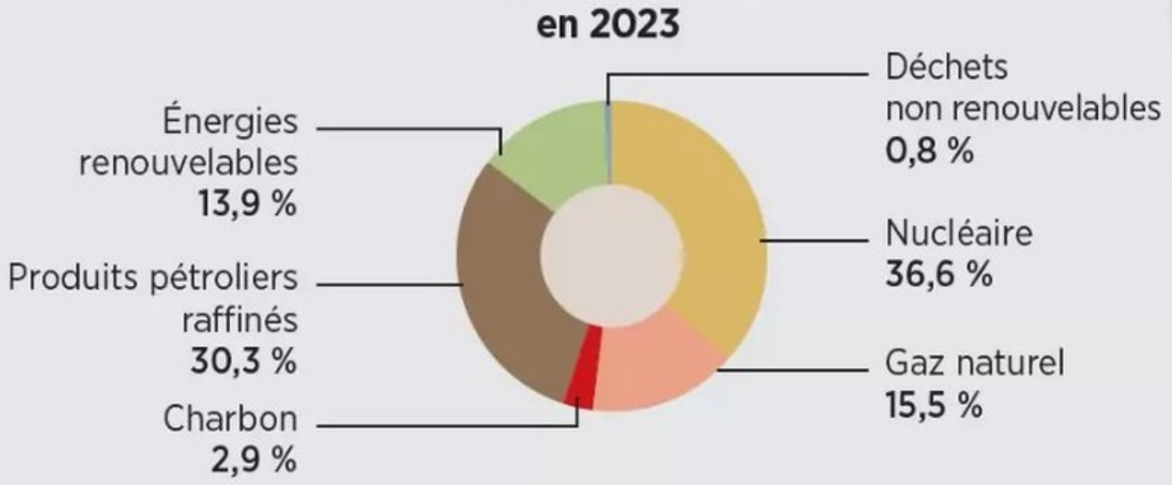
Nucléaire, l'exception française

Les énergies fossiles constituent encore près de la moitié de la consommation d'énergie primaire. Mais la France constitue une exception pour la production d'électricité, à travers son parc nucléaire, qui contribue notamment pour 63 % de la production d'électricité. Celle-ci est en baisse de 6,2 % par rapport à 2022. La production primaire d'énergie, en revanche, s'est élevée à 1420 TWh, en hausse de 13,3 % par rapport à 2022. Les émissions de GES ont reculé de 4,8% par rapport à 2022.

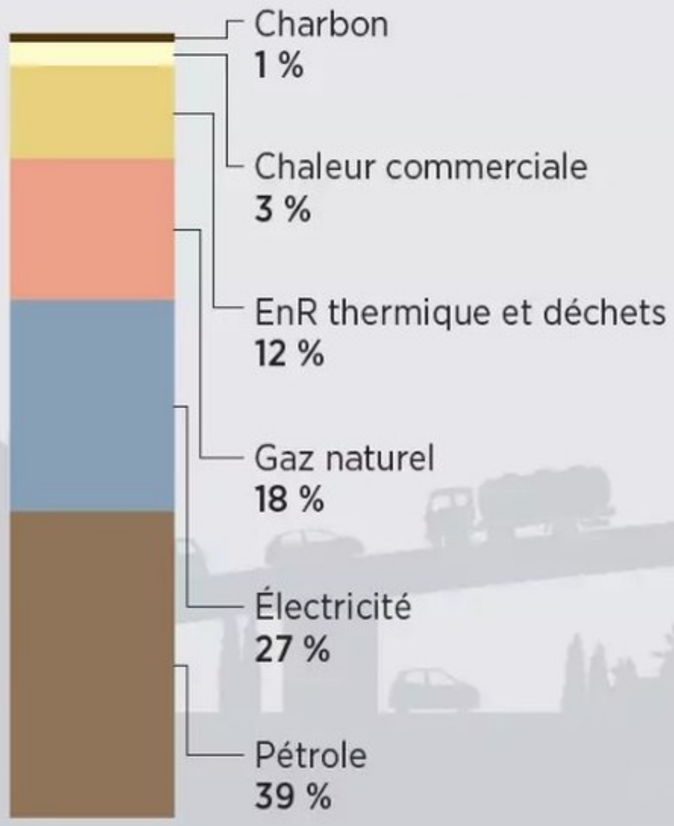
Monde, part des énergies dans la production d'électricité en 2023



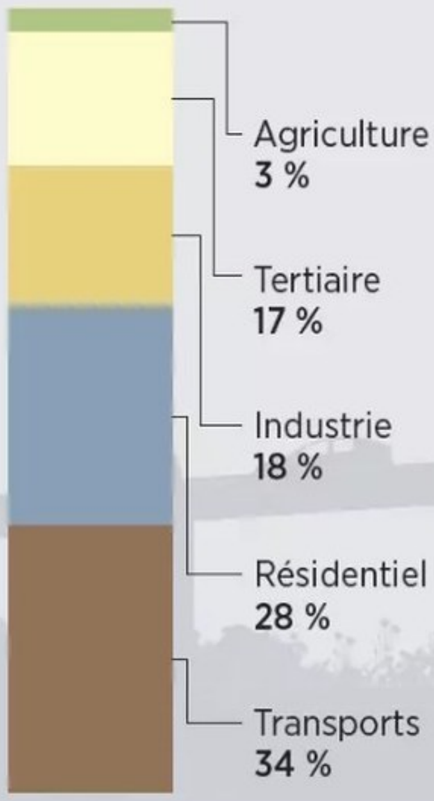
Mix énergétique de la France en 2023



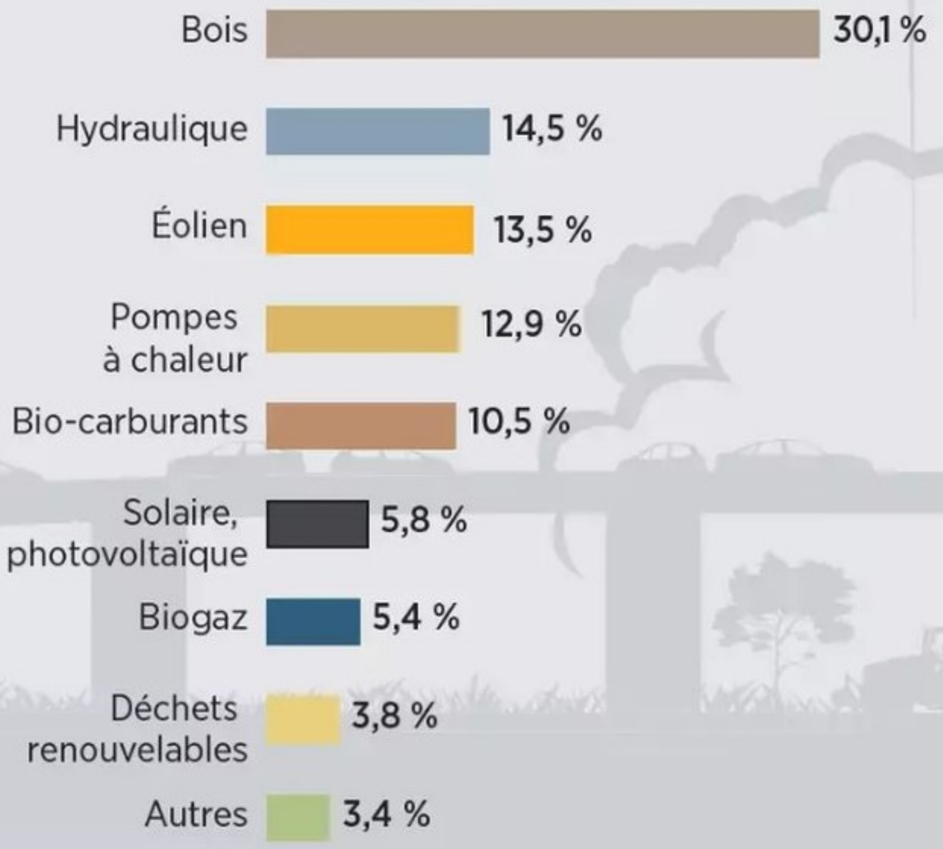
France, consommation finale énergétique par énergie



France, consommation finale énergétique par secteur



France, part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie primaire



SOURCES : WORLD ENERGY REPORT, RAPPORT 2022SUR LES INÉGALITÉS MONDIALES, CITEPA, MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Faits et chiffres

▶ En 2020, les trois quarts de l'acier mondial sont produits avec du charbon. Pour le remplacer (1 milliard de tonnes) par de l'hydrogène fabriqué par électrolyse, il faudrait l'équivalent de la production électrique annuelle des États-Unis, ou de 1,2 million d'éoliennes, qui comportent elles-mêmes de l'acier.

▶ L'humain brûle les combustibles fossiles près d'un million de fois plus vite que la Terre ne les reconstitue.

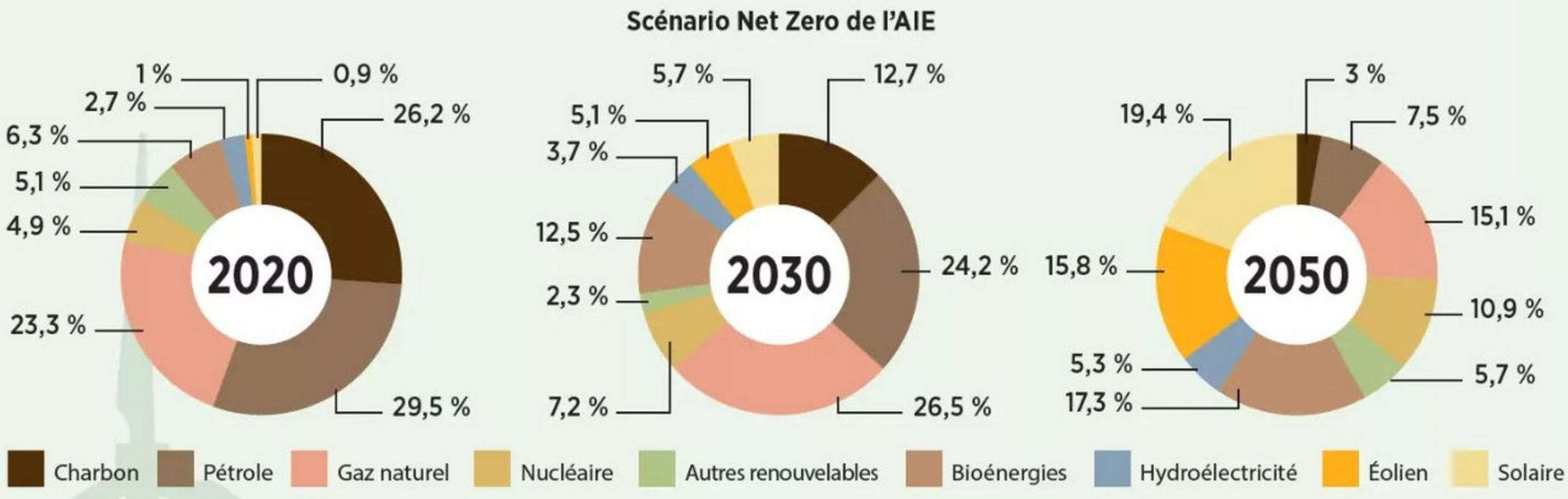
▶ D'après les économistes Gaël Giraud et Zeynep Kahraman, une croissance annuelle de 3% du PIB s'accompagne d'une augmentation de la consommation d'énergie de 5 %.

▶ Les 10 % les plus fortunés dans le monde émettent entre 35 et 40 % des gaz à effet de serre. Les 1% les plus fortunés en émettent 17 %.

▶ 685 millions de personnes vivent sans accès à l'électricité, dont 570 millions en Afrique subsaharienne. 2,1 millions se nourrissent en utilisant des combustibles traditionnels et polluants (charbon de bois...), ce qui cause 3,2 millions de décès chaque année.

Un futur énergétique à inventer

Objectif 2050 ! C'est à cette date, à quelques années près, que le pari doit être tenu : une décarbonation massive de l'énergie, permettant de limiter le réchauffement climatique. Pour y parvenir, des scénarios prospectifs et initiatives politiques sont élaborés à toutes les échelles. Et divers instruments sont mobilisés, des technologies à la sobriété.



Les scénarios mondiaux

Lors de l'Accord de Paris en 2015, 196 parties (États, Union européenne…) se sont engagées à maintenir la hausse des températures en dessous de 2° C par rappport aux niveaux préindustriels, et à viser la neutralité carbone en 2050. L'Agence internationtale de l'énergie, une organisation intergouvernementale de référence, a publié en 2021 trois scénarios pour y parvenir : **Steps** ou Politiques annoncées, la trajectoire selon les politiques publiques les plus récentes, prévoit une hausse des températures de 2,4 °C et un pic d'émissions de GES vers 2025, avec 30 gigatonnes (Gt) émises en 2050. **PAS**, Nouveaux engagements annoncés, suppose que tous les objectifs climatiques et énergétiques fixés par les gouvernements sont atteints dans les temps et dans leur intégralité. Dans ce scénario, la hausse de température est de 1,7 °C et les émissions de GES de 12 Gt en en 2050. Enfin, **Net Zero** (Zéro émission nette à l'horizon 2050), pour lequel l'augmentation de la température est de 1,4° C. Il postule d'importante évolutions sociétales et technologiques : moins de demande d'énergie, dont la moitié remplie par l'électricité, totalement décarbonée dès 2040 ; une énergie aux deux tiers renouvelables. À noter qu'il implique des technologies non encore matures, comme le captage de CO_2 ou l'hydrogène vert.

Objectifs européens

Adopté en 2020, le Pacte vert pour l'Europe est la feuille de route pour atteindre les objectifs de l'Europe. Ambition : être le premier continent neutre pour le climat : fin des émissions nettes de GES en 2050, avec une réduction d'au moins 55 % d'ici à 2030 et une croissance économique dissociée de l'utilisation des ressources. En février 2024, un objectif intermédiaire est recommandé : 90 % de réduction des émissions d'ici 2040. Outils : décarbonation de l'énergie, élimination des fossiles, captage du CO_2.

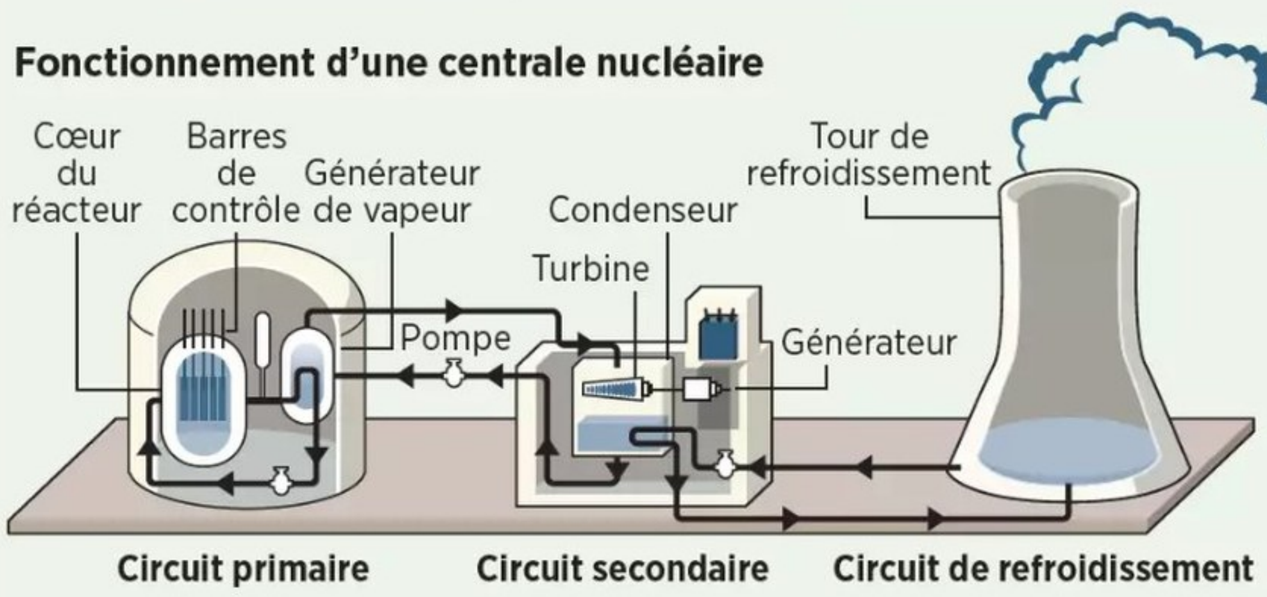
Objectifs français

En France, la stratégie Énergie Climat a été présentée en 2023. Un projet permettant d'inscrire dans la loi les trajectoires et objectifs permettant de sortir des énergies fossiles et de faire baisser massivement les émissions de GES aurait dû être discuté début 2024, mais a été reporté. Ses principaux axes : réduire de 40 à 50 % la consommation d'énergie en 2050 par rapport à 2021, avec une accélération d'ici à 2030 ; 55 % de plus de production d'électricité ; doublement de la production de chaleur bas carbone d'ici 2035 ; les émissions de GES doivent baisser de 50 % en 2030 par rapport à 1990. L'adaptation des réseaux, la sécurité d'approvisionnement, la préservation du pouvoir d'achat et la compétitivité sont également des objectifs. Pour les atteindre, la rénovation thermique des bâtiments doit être déployée à grande échelle, ainsi que l'électrification des transports.

Pour la transition, trois piliers, trois technologies

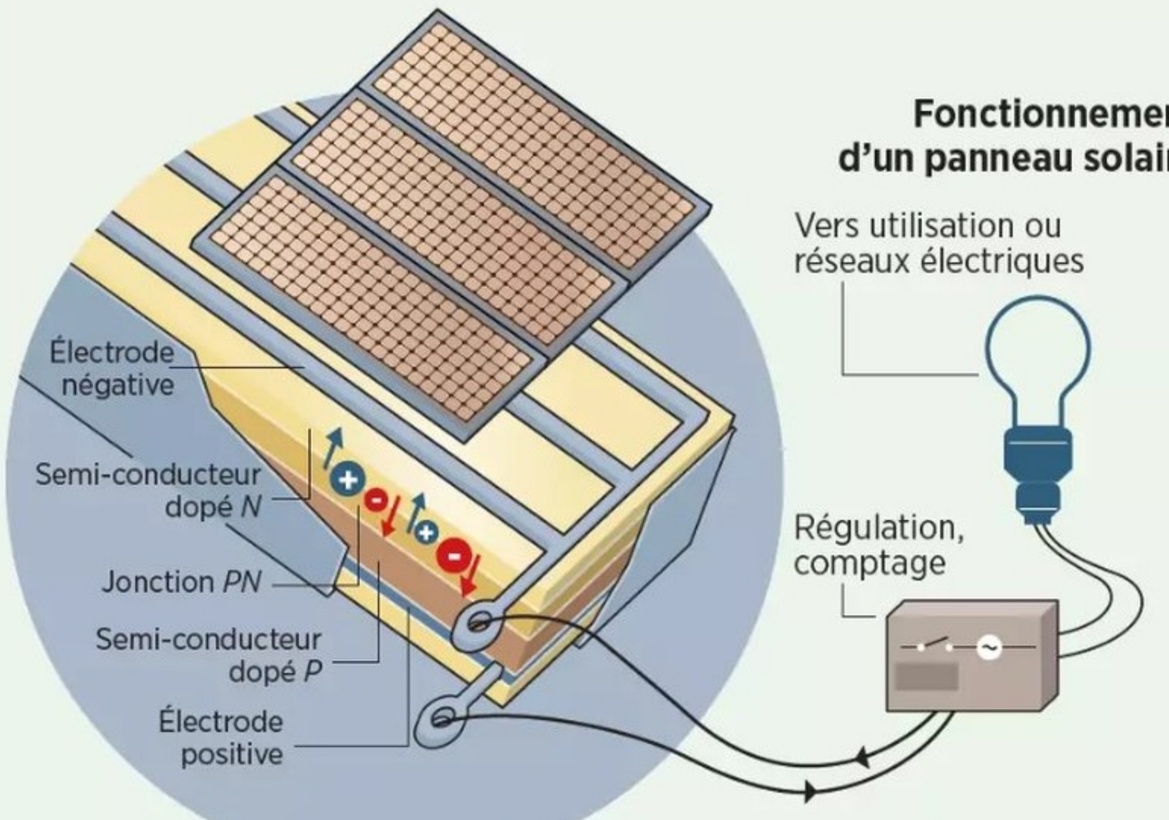
Les scénarios énergétiques encouragent la sobriété (diminuer le chauffage, favoriser covoiturage, mobilités douces et transports en commun, réduire l'éclairage…), prônent l'efficacité énergétique (isolation des bâtiments), préconisent la décarbonation : emploi massif des énergies renouvelables et, parfois,du nucléaire.

Fonctionnement d'une centrale nucléaire



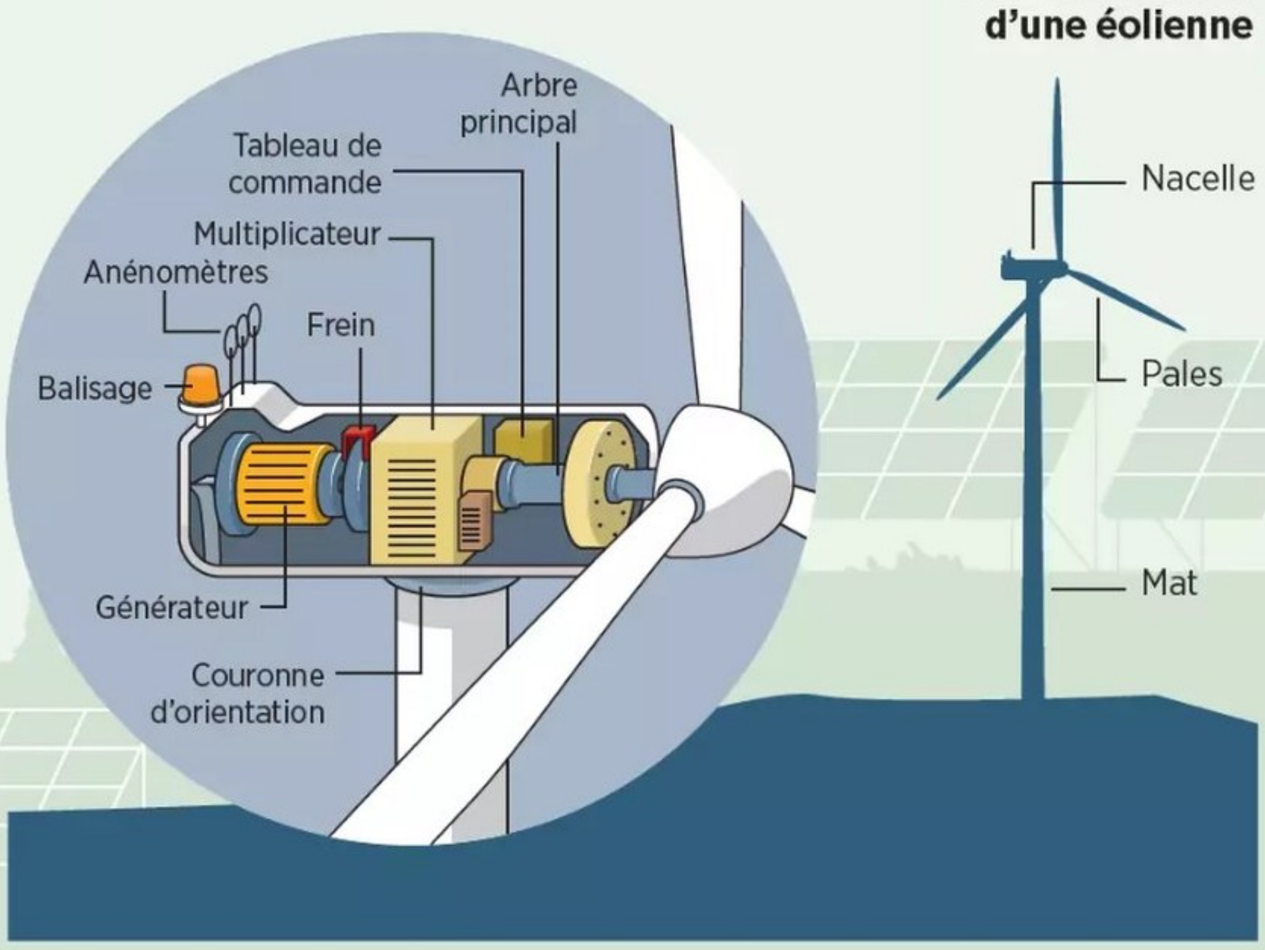
Au cœur du réacteur, des neutrons bombardent l'uranium. Des barres de contrôle régulent les réactions. Un fluide caloporteur récupère la chaleur obtenue et la transfère, via un générateur de vapeur, à un circuit secondaire où une turbine génère de l'électricité. La chaleur inutilisée est évacuée via un condenseur dans une tour de refroidissement.

Fonctionnement d'un panneau solaire



La cellule photovoltaïque est formée de plusieurs couches de matériaux semi-conducteurs comme le silicium, qui forment une « jonction ». En la percutant, les photons provoquent un transfert d'électrons de la zone négative (N) vers la zone positive (P). En raccordant les couches externes à un fil conducteur, le flux d'électrons mis en mouvement forme un courant. Le silicium est dopé avec d'autres éléments chimiques pour faciliter la réaction.

Fonctionnement d'une éolienne



Le vent fait tourner les pales composant un rotor. Ce mouvement est transmis, dans la nacelle qui abrite les élements mécaniques, à un multiplicateur qui augemente la vitesse de rotation du mouvement. Celui-ci peut être ralenti par un frein en cas de vents forts. Un générateur capte l'énergie cinétique et la transforme en électricité. Celle-ci est transmise, dans le mât, au réseau électrique via un transformateur. La nacelle s'oriente grâce à des moteurs. Les anémomètres mesurent la vitesse du vent.

Faits et chiffres

▶ 1/5 de la population mondiale dépense 4/5 de l'énergie totale. Or deux autres cinquièmes sont en cours de fort développement.

▶ Le méthane (fuites des gazoducs et mines de charbon, émissions des vaches, des rizières, des déchets) est responsable d'environ 30 % du réchauffement depuis la révolution industrielle.

▶ La concentration en CO_2 a augmenté de 51 % depuis le début de l'ère industrielle.

▶L'augmentation de la température globale atteint déjà 1,2 ° C.

▶ Le plastique est responsable de 3 à 5 % des émissions mondiales de CO_2. L'acier, le ciment, le plastique et les engrais représentent plus du quart des émissions.

▶ Les émissions de CO_2 des cimenteries ont triplé depuis 1990, représentant 8 % des émissions globales.

▶ En 2020, une voiture vendue sur 25 était électrique. En 2023, une sur 5.

▶ En 2024, la demande énergétique des centres de données, ou data centrers, représente environ 0,5 % de la consommation électrique mondiale. Elle pourrait tripler d'ici 2030.

▶ Une requête sur ChatGPT consomme dix fois plus d'électricité qu'une recherche sur Google.

▶ Les émissions de gaz à effet de serre de Google ont augmenté de 48 % en cinq ans à cause de l'intelligence artificielle.

▶ En France, la consommation électrique des data centers pourrait représenter l'équivalent d'une dizaine de réacteurs nucléaires.

SOURCES : CEA, TRANSITION ÉNERGÉTIQUE DE BERTRAND CASSORE/ DE BOECK, AIE, MINISTRÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, CONNAISSANCE DES ÉNERGIES, AIE

Objectif DÉCARBON

GETTY IMAGES

La vie sans pétrole n'est pas pour demain : le monde n'en a jamais consommé autant ! Mais l'objectif de neutralité carbone fixé pour 2050 entraîne déjà l'Europe dans une réduction forte de sa dépendance aux énergies fossiles. Comment ? En sollicitant plus que jamais la « fée électricité » dont la production est appelée à exploser. Une électricité produite par des énergies renouvelables, que nous devons toutefois apprendre à utiliser avec sobriété, pour nous garder de passer… d'une addiction à une autre.

ATION

PÉTROLE : LE SEVRAGE EST-IL POSSIBLE ?

Nous sommes tous accros à l'or noir. Niché dans les carburants, médicaments, produits d'entretien, shampooings ou smartphones, il nous accompagne à tout instant. Comment nous désintoxiquer de cette drogue « illicite » et, au-delà, de toutes les énergies fossiles ?

On le trouve partout : il se niche dans la plupart des objets que nous utilisons et sous-tend nombre de nos actions. Représentant plus de 30 % de la consommation énergétique mondiale, le pétrole est la source d'énergie la plus utilisée. Moteur de croissance économique et démographique, il joue aussi un rôle prépondérant dans notre vie quotidienne. Mais l'or noir est une énergie fossile, donc amenée à s'épuiser un jour. Plus inquiétant : le pétrole et ses dérivés (essence, kérosène, fioul…) constituent, avec le gaz et le charbon, les principales sources d'émissions de gaz à effet de serre, à l'origine du changement climatique. Et pourtant : bien que nous ayons pris conscience de la finitude des énergies fossiles et de l'impact désastreux de la hausse des températures sur la planète, nous sommes toujours aussi « accros » au pétrole. *« La consommation mondiale a explosé et s'élève aujourd'hui à 102 millions de barils par jour, soit à peu près deux fois plus que dans les années 1990 !* alerte Juliette Jannes, ingénieure en chimie, qui a travaillé dans l'industrie pétrolière avant de cofonder le cabinet de conseil climat et environnement Rong Yi. *C'est colossal : nous en utilisons presque autant que nous buvons d'eau : deux litres par jour en moyenne par habitant sur la planète – bien plus pour un Français, qui vit dans une économie très développée. »*

RONGYI SOLUTIONS

« NOUS UTILISONS PRESQUE AUTANT DE PÉTROLE QUE NOUS BUVONS D'EAU : DEUX LITRES PAR JOUR EN MOYENNE PAR HABITANT SUR LA PLANÈTE »

Juliette Jannes, cofondatrice du cabinet de conseil climat et environnement Rong Yi

Au niveau mondial, la demande continue de croître, moins vite qu'auparavant certes, *« mais cette tendance au ralentissement est plus que compensée par l'essor démographique des puissances émergentes,* complète Matthieu Auzanneau, directeur du Shift Project, groupe de réflexion sur la transition énergétique. *Car leur développement économique est entièrement lié aux énergies fossiles, comme cela a été longtemps le cas des pays occidentaux, mais avec une ampleur démographique et un rythme de croissance bien supérieurs ! »*

Comment, dès lors, sortir de notre addiction ? Comment parvenir en 2050 à la neutralité carbone afin de limiter le réchauffement de la planète à 1,5 °C par rapport aux niveaux pré-industriels, comme le préconise l'Accord de Paris de 2015 ? Un monde sevré de pétrole semble inenvisageable, tant celui-ci a infusé dans notre vie. D'ailleurs, aucun des scénarios prospectifs élaborés pour limiter la hausse des températures ne table sur sa disparition totale d'ici à 2050. Celui de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) ne prévoit qu'une baisse drastique, avec une consommation réduite à 24 millions de barils par jour. *« On pense surtout au pétrole dans sa fonction carburant, qui représente 75 à 80 % de l'utilisation d'un baril,* observe Juliette Jannes. *Le pétrole sert en effet à notre mobilité, mais aussi au transport de tout ce que nous consommons : pour faire venir un objet de Chine, ou encore pour aller, par exemple, chercher, extraire et exploiter des matières premières :* ◆◆◆

GETTY IMAGES

Composée d'hydrocarbures, l'huile moteur minérale est utilisée pour la lubrification des moteurs à combustion interne. Avec leur abandon progressif, l'avenir de ce produit n'est pas des plus radieux.

GETTY IMAGES

◆◆◆ *minerai de fer, sable… On oublie trop souvent sa deuxième application : les 20 % restants dans le baril, qui alimentent la chimie. Le pétrole se niche partout, dans les plastiques, solvants, huiles moteur, lubrifiants au sens large, nylons, paraffines…* » L'agriculture se nourrit, elle aussi, d'hydrocarbures, au travers des engrais et pesticides chimiques. Se passer demain des énergies fossiles « *demanderait un tel changement de société que ce n'est pas envisageable* », renchérit Stéphane Sarrade, directeur des programmes énergie au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA).

LES CHIFFRES

81,5 %
Pourcentage d'énergies fossiles dans le mix énergétique mondial en 2023, en baisse de 0,4 % par rapport à 2022.

31,7 %
Part du pétrole dans ce même mix en 2023, devant le charbon (26,5 %) et le gaz naturel (23,3 %).

19,4 millions de barils par jour
Production de pétrole des États-Unis, qui occupent le premier rang mondial (20 % de l'offre). L'Arabie saoudite n'en représente que 11,8 %, la Russie 11,5 %.

35,2 %
Part du charbon comme source d'électricité dans le monde, loin devant les énergies renouvelables. Pour la première fois en 2023, la consommation de charbon en Inde a dépassé celle de l'Amérique du Nord et de l'Europe réunies.

Depuis le premier choc pétrolier en 1973, la recherche planche sur des alternatives moins polluantes, mais le succès de cette huile noire et visqueuse tient à des qualités qui s'avèrent pratiquement irremplaçables. « *Si le pétrole a permis l'explosion de la puissance économique mondiale, c'est grâce à ses multiples propriétés naturelles*, souligne Matthieu Auzanneau. *Trois au moins sont décisives. D'abord, comme les autres énergies fossiles, il cumule les fonctions de stock et de flux, contrairement à l'électricité, qui ne se stocke pas.* » Ensuite, c'est une source d'énergie dense, très performante pour les moteurs de voiture et équipements industriels. « *La seule qui soit plus dense, le minerai d'uranium, est bien plus compliquée à exploiter, alors qu'il est très simple de raffiner du pétrole.* » Enfin, « *il est liquide, ce qui permet de le mobiliser beaucoup plus facilement qu'une source gazeuse ou solide, simplement en utilisant la gravité et l'écoulement.* » Il peut être transporté presque sans intervention humaine.

Pour remplacer les énergies fossiles, le scénario proposé par l'AIE mise sur l'innovation technologique et parvient ainsi « *à effacer 50 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre avec des solutions identifiées : énergies renouvelables et nucléaire, véhicules électriques, régimes alimentaires avec peu de viande* », écrit Stéphane Sarrade. Reste un obstacle de

Depuis 2016, la France a adopté plusieurs lois interdisant certains usages du plastique : sacs de caisse non réutilisables, vaisselle jetable, emballages de fruits et légumes… Et l'Union européenne a décidé que tous les emballages seraient recyclables à partir de 2030, et recyclés de façon systématique d'ici à 2035.

taille : « *45 % des innovations technologiques nécessaires pour les secteurs fortement carbonés – industrie lourde, transport maritime, agriculture ou industrie numérique – n'existent pas ou sont encore en développement pour produire électricité, hydrogène et chaleur décarbonés.* »

Alimentation, mobilité, habitat : consommer moins, consommer mieux

Aucune des filières alternatives aux énergies fossiles n'est à l'échelle de nos gargantuesques besoins, aucune d'entre elles n'est en mesure de satisfaire notre frénésie de consommation, et beaucoup de procédés qui fonctionnent sur la paillasse ne sont pas matures d'un point de vue industriel. « *Pour les applications carburant du pétrole, on mise sur l'électrification. Cela fonctionne bien pour les voitures mais n'existe pas pour l'heure pour les engins de chantier, les porte-conteneurs ou les avions,* détaille Juliette Jannes. *Pour l'aérien, on met en avant les carburants d'aviation durables, c'est-à-dire des huiles végétales qu'on transforme en biodiesel, ou bien encore du CO_2 qu'on capture et que l'on fait réagir avec de l'hydrogène pour reconstituer un hydrocarbure. Ces technologies sont bien connues mais très coûteuses, et les filières pas du tout à l'échelle des besoins!* » L'ingénieur fondateur du Shift Project, Jean-Marc Jancovici, attire lui aussi l'attention sur la complexité de la substitution à même volume. « *Si vous faites un rapide calcul d'ordre de grandeur, vous voyez que pour faire voler tous les avions qui décollent actuellement d'un aéroport français en remplaçant le kérosène par des carburants d'origine durable, produits avec de la biomasse combinée à de l'hydrogène lui-même produit avec de l'électricité décarbonée, il faudrait mobiliser plus que la récolte totale actuelle de bois en France.* »

Il est de toute façon illusoire d'imaginer la transition « *comme un processus linéaire qui verrait le passage d'une source d'énergie – ou d'un ensemble de sources – à une autre,* rappelle l'historien des techniques François Jarrige. *Un tel schéma, qui repose sur l'idée rassurante que les sociétés cheminent selon un progrès inéluctable, dans ce domaine comme dans les autres, n'a pas lieu d'être* ». Dans l'histoire, les énergies ne se succèdent pas : elles cohabitent, s'accumulent, et les innovations miraculeuses ne remplacent pas les systèmes précédents, elles ne font que s'y ajouter. « *Il faudrait un sacré paquet d'éoliennes et de panneaux solaires pour remplacer ce qu'on produit avec le pétrole quasi gratuit, le charbon qu'on extrait facilement et le nucléaire!* », pointe l'historien. On en est loin effectivement… En 2023, alors que les sources d'énergie carbonées représentaient encore plus de 60 % de la production mondiale d'électricité, éoliennes ◆◆◆

Solutions de remplacement : trois fausses bonnes idées

Certaines promesses de progrès technique s'avèrent illusoires, voire contreproductives. En voici trois exemples.

Les carburants de synthèse ou e-fuels

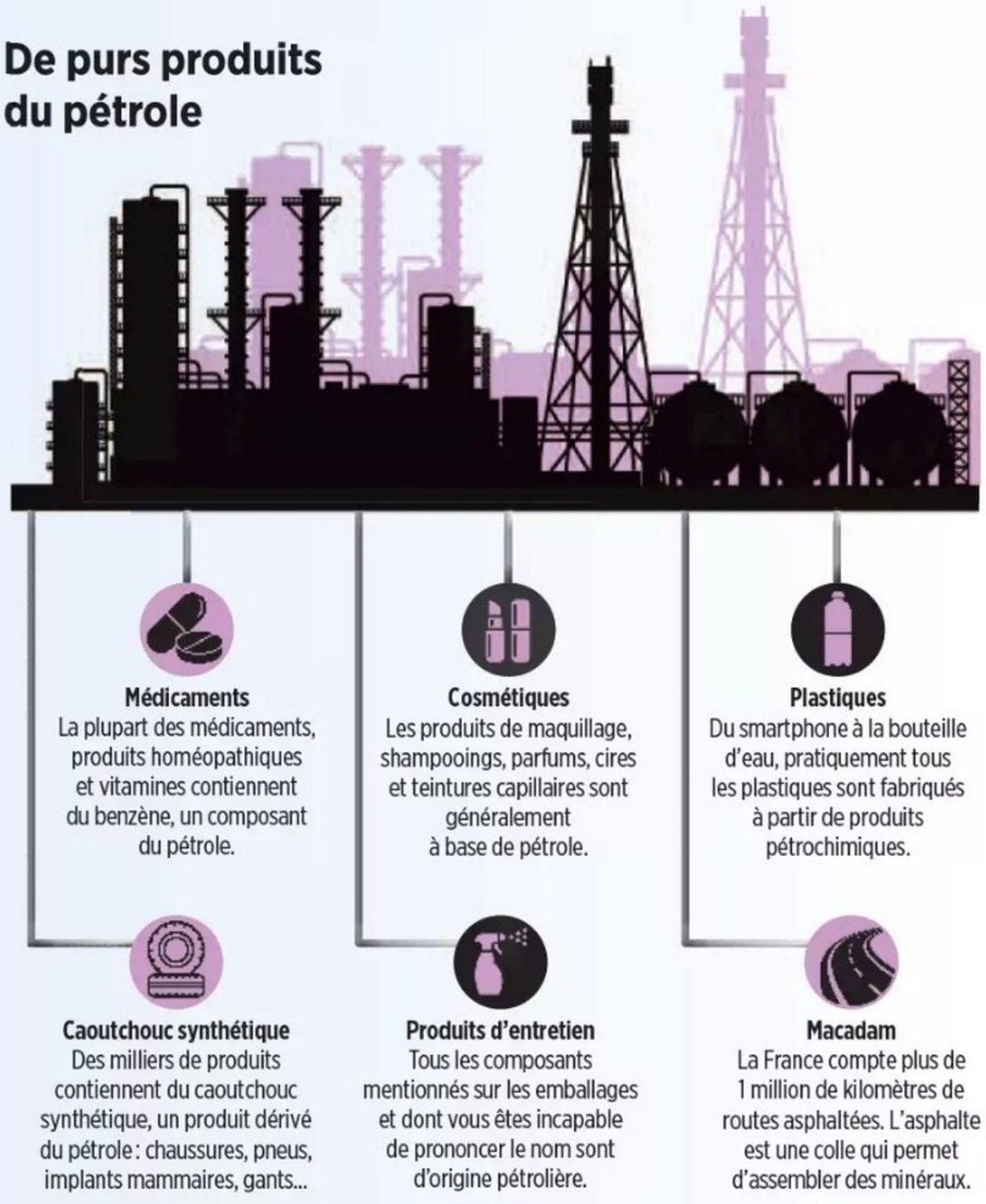
Synthétisé en laboratoire, l'e-fuel se compose d'hydrogène issu de l'électrolyse de l'eau, et de dioxyde de carbone capté dans l'air ou récupéré de l'industrie, à la sortie d'une usine par exemple. Atout : l'e-fuel peut être utilisé sur tout moteur thermique en remplacement des carburants fossiles. Principal avantage : le CO_2 émis dans l'atmosphère lors de sa combustion est théoriquement équivalent au CO_2 capturé. Mais les procédés pour le fabriquer – par exemple, pour la capture du CO_2 – sont complexes et onéreux. Son rendement énergétique est faible en comparaison avec un véhicule à batterie électrique.
Et sa neutralité carbone ne peut être garantie que si toute l'électricité utilisée dans le processus de production est générée à partir de sources d'énergie renouvelable, et si le carbone provient à 100 % de la capture directe de l'air pour éviter toute émission supplémentaire de CO_2 dans l'atmosphère. Une gageure.

Les agrocarburants

Au début du XXIe siècle, ils ont été présentés comme la panacée. Ces carburants issus de cultures de colza, de pomme de terre ou de betterave ne remplacent pas l'essence ou le gazole mais sont mélangés avec ces derniers. En prenant en compte leur cycle de vie entier, le bilan carbone des biocarburants s'avère souvent plus négatif que celui de leurs équivalents fossiles, et aucun ne répond au seuil imposé par la directive européenne RED II d'au moins 50 % de réduction des émissions de gaz à effet de serre par rapport aux carburants fossiles. En outre, leur production entraîne un besoin accru en surfaces agricoles. De plus, les espèces végétales utilisées sont aussi celles pour lesquelles on emploie le plus de traitements phytosanitaires!

La route solaire

Le projet lancé en 2016 par Ségolène Royal, alors ministre de l'Environnement, consistait à recouvrir les routes de panneaux photovoltaïques pour produire de l'électricité. L'objectif était d'en installer quelque 1 000 kilomètres d'ici à 2020. Mais le test sur une portion d'un kilomètre de départementale dans l'Orne a douché les espoirs : la production électrique était dérisoire et l'équipement s'abîmait vite.
Le tronçon test a fini par être démoli en juin dernier.



◆◆◆ et panneaux photovoltaïques en fournissaient à peine 16 %.

Les scénarios visant la neutralité carbone en 2050 s'accordent aujourd'hui sur un double constat : la sortie des énergies fossiles exige avant tout une modération de notre consommation, et elle s'appuiera sur une électrification massive des usages. *« La technique ne nous sauvera pas. En tout cas, pas toute seule ! La réponse, c'est la sobriété structurelle,* résume Matthieu Auzanneau. *C'est-à-dire : faire en sorte que, collectivement, on s'organise pour que nos systèmes techniques soient aussi économes que possible en énergie et en matière ; et utiliser la technique de façon réaliste et salubre, en l'enchevêtrant avec des réponses organisationnelles et sociétales. »* Pour réduire drastiquement la consommation d'énergie, le Shift Project prône une approche transversale et une planification. Stéphane Sarrade vante lui aussi la sobriété, qu'il définit comme une « déconsommation » : *« Consommer moins quantitativement, mais beaucoup mieux qualitativement. » « À quoi sommes-nous disposés à renoncer et,* a minima, *que sommes-nous prêts à changer rapidement ? »*, interroge-t-il. Les priorités étant nos habitudes alimentaires, nos choix de mobilité et donc aussi d'habitation. La sobriété doit en outre être assortie d'une efficacité énergétique renforcée : isolation des bâtiments, amélioration du rendement des appareils électriques, réduction de la consommation des voitures et des poids lourds, allongement de la durée de vie des équipements, recyclage optimisé…

Une inconnue, la révolution de nos modes de vie

Le déploiement de l'électrification fait aussi consensus, notamment pour les transports. C'est sur le mix énergétique que les scénarios divergent : l'association négaWatt opte intégralement pour les énergies renouvelables et préconise un arrêt progressif de la production nucléaire d'ici à 2045, *« dans un souci de sécurité »*. Stéphane Sarrade considère au contraire *« qu'opposer énergies renouvelables, parfois intermittentes, et énergie nucléaire pilotable décarbonée est un combat d'un autre temps. Aucune de ces énergies prises séparément ne pourra répondre à une demande d'énergie telle que nous l'envisageons »*. Le Shift Project, lui aussi, mise sur *« tous les leviers capables de bâtir l'économie post-énergies fossiles… »* dont le nucléaire.

Au-delà de ces divergences demeure une inconnue : celle de notre capacité à effectuer une réelle révolution de notre mode de vie, à saisir enfin qu'aucune énergie n'est infinie. Un exemple suffit à montrer à quel point le sevrage énergétique sera douloureux : « Homo energeticus *envoie et reçoit des mails sans compter, chacun parcourant environ 15 000 kilomètres de câbles sous-marins […] pour arriver à son destinataire, même si ce dernier est dans le bureau d'à côté !* souligne Stéphane Sarrade. *Si Internet était un pays, il serait le troisième plus gros consommateur d'électricité au monde juste derrière la Chine et les États-Unis. »* L'empreinte carbone du numérique représentait déjà, en 2021, entre 3 et 4 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre. *« Aujourd'hui, c'est le numérique qui génère chez nous l'illusion de perspectives infinies »*, prévient Stéphane Sarrade. Avec à la clé une consommation toujours plus frénétique, voire compulsive, d'énergie. **ÉLIANE PATRIARCA**

Stéphane Sarrade, *Homo Energeticus. Pour une transition bas carbone*, humenScience, 2023

François Jarrige et Alexis Vrignon (dir.), *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, La Découverte, 2020

The Shift Project, *Plan de transformation de l'économie française, Odile Jacob,* 2022

Vers un monde tout électrique ?

L'électrification à marche forcée des transports, de l'industrie et de l'habitat doit permettre de répondre au défi de la décarbonation. Mais comment faire ?

Vélo, trottinette, pompe à chaleur, climatiseur, ordinateur et, parfois, voiture : l'électricité semble omniprésente dans notre quotidien. Pourtant, en 2023, elle ne représente que 30 % de la consommation d'énergie finale en France. Mais à l'heure où l'objectif est d'atteindre la neutralité carbone en 2050, tous les regards se tournent vers la « fée électricité ». Elle devrait occuper la première place – 55 % de la consommation d'énergie finale – en 2050, selon la stratégie bas carbone du gouvernement. Serait-elle la solution miracle ?

L'électricité française présente un avantage certain : elle est largement décarbonée, car produite à 65 % par le nucléaire et à 26 % par les énergies renouvelables. *« Encore faut-il qu'elle le reste. D'ici à 2050, il faudra remplacer ou moderniser le parc nucléaire »*, avertit Marie Dégremont, chercheuse associée à Sciences Po, spécialiste de politique énergétique. Un chantier colossal. Ainsi, le coût de la rénovation des réacteurs des années 1980, qui doit être bouclée en 2028, se monte à 66 mil- ◆◆◆

L'explosion prévue de la demande en électricité constitue un défi pour les réseaux de transport et de distribution nationaux (ici, un chantier en Chine). En France, RTE et Enedis comptent investir 100 milliards d'euros chacun sur la période 2022-2040.

XINHUA/HUANG WEI/ABC/ANDIA.FR

◆◆◆ liards d'euros. Celui des six nouveaux réacteurs EPR2, dont la construction s'étalera de 2025 à 2050, est quant à lui estimé à 52 milliards.

Dans les écoles, climatiseurs géants ou végétalisation ?

En outre, depuis la guerre en Ukraine, les États membres de l'Union européenne se sont engagés à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre (GES) de 55 % en 2030 par rapport à 1990, alors que la France, lorsqu'elle a adopté en 2020 sa stratégie bas carbone pour 2050, tablait sur un objectif de 40 %. Les besoins en électricité vont donc augmenter encore plus vite que prévu. Dans son scénario de référence publié en 2023, RTE, le gestionnaire du réseau de transport d'électricité, mise sur une consommation d'électricité en hausse, atteignant 640 TWh en 2035, soit une augmentation de 22 % par rapport à 2021. Une telle bascule nécessite une électrification sans précédent dans de nombreux secteurs.

Selon RTE, cet objectif est réalisable à condition d'activer dès aujourd'hui quatre leviers : efficacité énergétique, sobriété, énergies renouvelables et nucléaire. Les deux premiers ont pour but de diminuer la demande. « *Au lieu de vouloir électrifier à tout va, il faut réfléchir aux usages pour trouver la solution la plus adaptée d'un point de vue économique et environnemental,* souligne Marie Dégremont. *Par exemple, quand on rénove une école, on peut soit installer un climatiseur puissant qui consommera beaucoup d'électricité, soit ajouter de l'ombre, de la végétation, et se contenter d'un petit modèle.* »

Les deux autres leviers s'intéressent à l'offre. Pour les énergies renouvelables, l'objectif est d'atteindre entre 160 à 190 GW de puissance en 2035 contre 70 GW en 2023, ce qui a pour conséquence d'accélérer les installations. De son côté, le nucléaire devrait fournir 360 TWh au minimum en 2035 contre 320 TWh en 2023. Une croissance atteignable si trois facteurs sont combinés : la mise en service de l'EPR de Flamanville en 2024, une meilleure disponibilité des réacteurs actuels et une prolongation de leur exploitation jusqu'à l'âge de 50 ou 60 ans.

Les transformations vont aussi concerner de très près les réseaux de transport de RTE et de distribution d'Enedis. Maillons essentiels du réseau électrique, ces deux entités devront intégrer ce surcroît d'énergie décarbonée, savoir la stocker, tout en garantissant la sécurité d'approvisionnement. Un investissement qui doit atteindre la bagatelle de 100 milliards d'euros pour RTE mais aussi pour Enedis, pour la période allant de 2022 à 2040.

Reste une inconnue de taille : les secteurs que l'État incite à s'électrifier vont-ils le faire, et à quelle vitesse ? Les transports sont visés en priorité. C'est de loin l'activité la plus forte émettrice de GES en France. La moitié de ces émissions provenant des voitures particulières, tout pourrait changer avec le déploiement massif du véhicule électrique. À partir de 2035, la vente des voitures neuves thermiques sera interdite en France. À cet horizon, le parc devrait atteindre 18 millions de véhicules électriques ou hybrides rechargeables, contre 1,6 million à la fin de 2023, selon Enedis. Cela nécessite un surplus de production d'électricité de 40 TWh en 2035, tout à fait gérable selon RTE à condition de piloter les consommations. Encore faut-il que cette électricité reste décarbonée.

120 000 bornes de recharge publiques sont aujourd'hui déployées en France. L'objectif est de 400 000 en 2030.

Aujourd'hui, le réseau fait appel aux centrales thermiques à gaz, fortement émettrices de CO_2, pour faire face aux pics de consommation. À l'avenir, deux solutions sont avancées pour éviter ce recours : le pilotage de la recharge des batteries, programmé à la demande à des heures creuses, et le *vehicle-to-grid,* c'est-à-dire leur utilisation pour stocker l'électricité et la réinjecter dans le réseau. Le *vehicle-to-grid* sera lancé à la fin de 2024 en France. Un pilotage généralisé diviserait par trois au moins les besoins de puissance nécessaire pour faire face aux pics, et peut-être par cinq le coût d'un « plein électrique » par rapport au thermique. Cerise sur le gâteau, il favoriserait l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau en augmentant ses capaci-

LA FABRIQUE DE LA CITÉ

« AU LIEU DE VOULOIR ÉLECTRIFIER À TOUT VA, IL FAUT RÉFLÉCHIR AUX USAGES POUR TROUVER LA SOLUTION LA PLUS ADAPTÉE DU POINT DE VUE ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTAL »

Marie Dégremont, spécialiste des transitions énergétiques

LAURENT GRANDGUILLOT/REA

tés de stockage. « *Reste à savoir si tous les usagers passeront à la voiture électrique et au pilotage. Les incitations financières vont jouer un grand rôle, l'ergonomie des outils et l'offre des constructeurs automobiles aussi* », observe Marie Dégremont.

100 000 camions électriques longue distance en 2035

De son côté, l'électrification du transport routier de marchandises (90 % du fret et 7 % des émissions de GES) démarre à peine. D'une part, le prix d'un poids lourd électrique est aujourd'hui trois fois plus élevé que son équivalent au gazole. Et il restera plus cher d'environ 40 % d'ici à 2040, selon le Comité national routier. D'autre part, même si les acquéreurs peuvent bénéficier d'incitations financières, ils doivent pouvoir trouver des points de charge assez puissants. RTE mise sur environ 100 000 camions électriques longue distance en 2035 (12,5 % du parc), ce qui nécessitera 12 200 points de charge. « *Des solutions alternatives sont à l'étude : induction grâce à des bobines insérées dans le sol et sous le véhicule, via un rail sur des sections d'autoroute, ou encore échange de batteries à la station* », ajoute Marie Dégremont. Des tests de recharge par induction ont été effectués en juin dernier à Paris avec des voitures sur une portion de route de 30 mètres. *In fine*, quelle que soit la technologie retenue, des investissements considérables sont à prévoir.

Dans le transport maritime, la propulsion électrique reste marginale. Elle concerne surtout les bateaux de plaisance et les ferries pour de courtes distances : fjords en Norvège, traversée de la Manche. Un premier cargo tout électrique a été lancé en 2021 en Norvège. Les problèmes d'autonomie sur de longues distances ne sont pas résolus pour autant. Idem pour le transport aérien, qui n'est pas près de passer à l'électrique.

Le secteur de l'industrie se trouve, quant à lui, confronté à un double challenge : il doit accélérer sa décarbonation tout en remédiant à la désindustrialisation. Les trois principales activités qui contribuent aux émissions de GES sont la chimie (26 %), les matériaux de construction (24 %) ainsi que la métallurgie (23 %). L'électrification de ces secteurs est en marche, notamment dans les 50 plus gros sites français, qui représentent à eux seuls 55 % des émissions industrielles. Elle peut se faire directement via des pompes à chaleur pour du chauffage à moins de 150 °C et, au-delà, par des fours et des résistances.

Incertitudes sur l'évolution du prix du kilowattheure

Ainsi, les fours industriels, qui consomment chaque année 155 TWh d'énergie essentiellement d'origine fossile, pourraient être électrifiés. Selon une étude du cabinet de conseil Colombus Consulting, le nombre de fours électriques devrait doubler ou tripler d'ici à 2035. Mais il existe des freins : le coût d'investissement élevé, la nécessité de faire certifier le process industriel, et l'incertitude quant à l'évolution des prix de l'électricité. Des obstacles qui peuvent gêner aussi le passage à l'hydrogène vert dans les industries utilisant aujourd'hui de l'hydrogène carboné *(lire p. 42-45)*.

Enfin, dans le secteur de l'habitat, le déploiement des pompes à chaleur, combiné à la rénovation thermique des bâtiments, pourrait réduire les émissions de 26 millions de tonnes équivalent CO_2 en 2030 par rapport à 2019. Les pics de consommation resteraient absorbables par le système électrique, selon RTE. Mais, là aussi, tout va être une question de rythme. *In fine*, la fée électricité ne créera probablement pas de miracles...

MARIE-LAURE THÉODULE

LES CHIFFRES

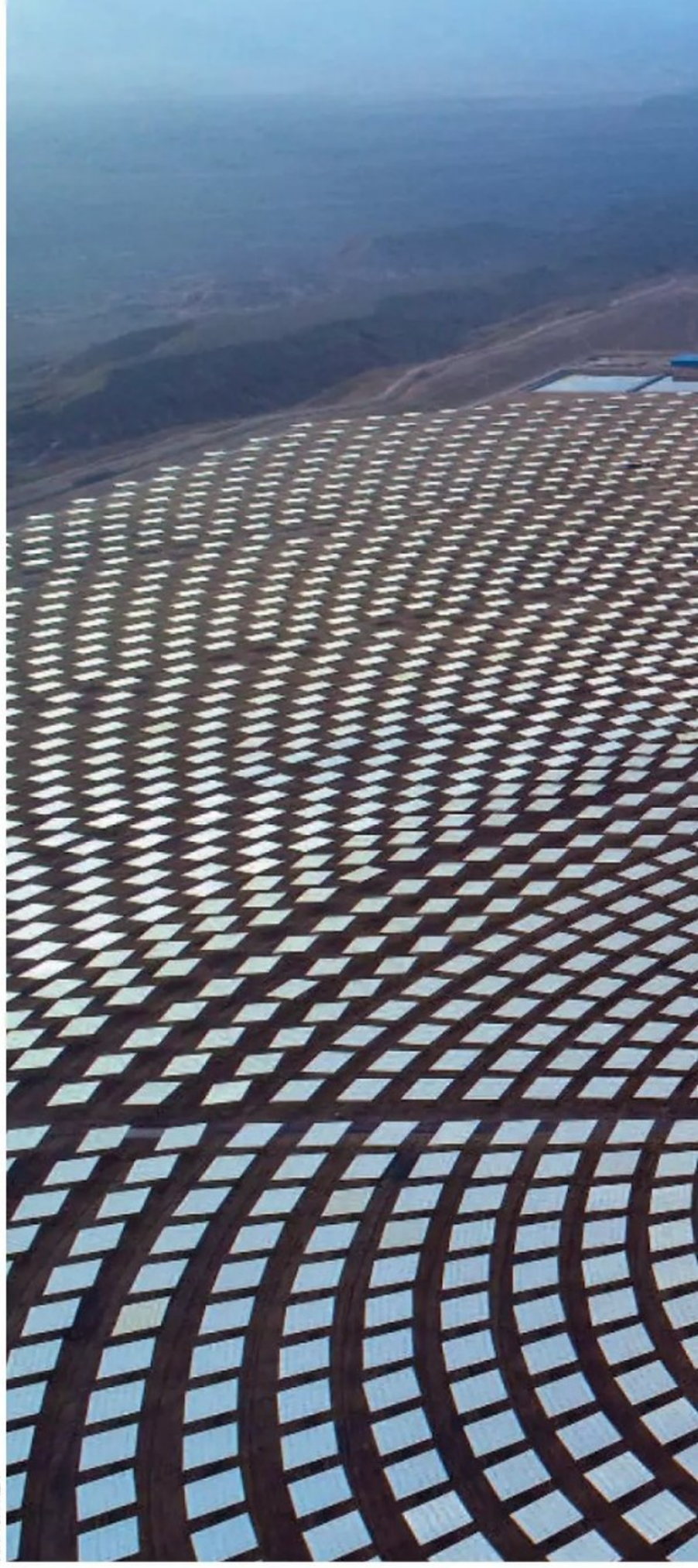
30 000 TWh

Production mondiale d'électricité en 2023 (+ 2,5 % par rapport à 2022), obtenue à 60 % à partir d'énergies fossiles, dont le charbon.

495 TWh

Production d'électricité en France en 2023 (pour une consommation de 446 TWh). **65 %** proviennent du nucléaire, **26 %** des énergies renouvelables (éolien, photovoltaïque, hydroélectrique).

Renouvelables: vers la fin de l'intermittence



XINHUA-REA

Engranger l'énergie produite par le solaire et l'éolien pour la restituer à la demande : ce défi est aujourd'hui en passe d'être remporté, grâce à l'augmentation des capacités de stockage et au pilotage de réseaux européens.

C'est certain, le soleil ne brille pas la nuit et le vent ne souffle pas à toute heure. L'argument est régulièrement avancé par les opposants aux énergies renouvelables : produites de façon discontinue, elles ne sauraient rivaliser avec les énergies nucléaire, thermique et hydraulique. Pourtant, en 2030, éoliennes et panneaux photovoltaïques fourniront 55 % de l'électricité de l'Union européenne. Ainsi en ont décidé les 27 États membres lors de la révision de la directive sur les énergies renouvelables, le 9 octobre 2023. Et, en 2050, le monde s'appuiera principalement sur les énergies intermittentes. Le solaire et l'éolien s'insèrent déjà nuit et jour de manière stable sur le réseau, et une décennie d'investissements suffira pour que l'intermittence ne soit plus qu'un souvenir. Grâce au stockage de l'électricité et à la gestion de sa distribution.

L'équilibre de la distribution entre production et consommation, c'est en France le travail de Réseau de transport d'électricité (RTE). Un équilibre qui impose, depuis que le réseau électrique existe, qu'à chaque seconde les électrons se déplacent à la même fréquence : 50 hertz (Hz) sur tout le continent européen. Une soudaine défaillance de production, ne permettant pas de répondre instantanément à la demande, peut mettre en péril cet équilibre, provoquant *a minima* des perturbations sur les appareils électriques et, au pire, l'effondrement du service, le *black-out*. « *Pour maintenir cette fréquence, nous pouvons nous appuyer, d'une part, sur les prévisions de production des centrales nucléaires mais aussi des énergies renouvelables grâce à la météo et, d'autre part, sur la flexibilité des consommateurs,* expose Yannick Jacquemart, directeur Nouvelles flexibilités à RTE. *Car face à une énergie intermittente, on peut jouer sur la consommation, soit en mettant momentanément hors service les machines industrielles – c'est l'effacement, qui donne lieu à des contrats avec les entreprises –, soit en éteignant à distance les appareils ménagers.* » Ainsi, le chauffage des logements peut être éteint un quart d'heure sans que l'occupant en ressente une gêne.

100 mégawatts-heure d'énergie immédiatement mobilisable

Demain, l'augmentation de la part des énergies intermittentes dans la production sera corrigée par la sobriété des usages, qui va faire diminuer l'intensité des pics – la consommation électrique baisse depuis 2010 grâce à l'efficacité énergétique des équipements et au comportement

CORSICA SOLE

« LES BATTERIES LITHIUM-ION PERMETTENT D'ACCUMULER L'ÉNERGIE AUX HEURES ENSOLEILLÉES POUR L'INJECTER SUR LE RÉSEAU À L'HEURE DE POINTE, ENTRE 19H ET 21H, QUAND LA PRODUCTION S'ARRÊTE »

Jean-Gabriel Steinmetz, Corsica Sole

La centrale solaire à tour Noor III, à Ouarzazate (Maroc). Sa capacité de stockage thermique lui permet de produire de l'électricité jour et nuit.

des consommateurs –, mais aussi par l'accroissement des capacités de stockage dans des batteries à lithium-ion. Les gestionnaires visent deux stratégies : le *vehicle-to-grid* et la centrale de stockage.

L'idée, dans le premier cas, est d'utiliser les batteries des voitures électriques des particuliers lorsqu'ils ne s'en servent pas pour stocker l'énergie en excès dans le réseau. Cette stratégie est notamment testée à l'Institut national de l'énergie solaire (CEA et université Savoie Mont Blanc), à Chambéry. Simple sur le papier, elle nécessite cependant pour un fonctionnement harmonieux le développement de logiciels et l'apport de l'intelligence artificielle.

Quant à la centrale de stockage, elle consiste à empiler des batteries dans des containers pour additionner leurs puissances. Elle bénéficie d'ailleurs indirectement de la diffusion des véhicules électriques, qui fait baisser le coût des batteries. Le leader européen de cette technique est corse. En 2015, Corsica Sole a inauguré Alata, une centrale de 4,4 mégawatts (MW) qui alimente 1100 foyers du sud de l'île. Des containers abritent des batteries lithium-ion qui cumulent une capacité de stockage de 4,3 MWh. *« Cela nous permet d'accumuler la production des panneaux solaires aux heures les plus ensoleillées pour injecter cette énergie sur le réseau à l'heure de pointe, entre 19 h et 21 h, au moment où la production de la centrale s'arrête »*, décrit Jean-Gabriel Steinmetz, directeur Nouveaux marchés à Corsica Sole. Cette première réalisation a permis au producteur corse d'engranger de l'expérience et lui a valu d'être choisi pour construire à Deux-Acren (Belgique) un centre de 50 MW, capable de stocker 100 MWh d'énergie immédiatement mobilisable pour stabiliser le réseau, sans émissions de gaz à effet de serre. Corsica Sole est ainsi le gestionnaire de la plus grosse centrale de stockage à batteries d'Europe.

Un record qui va rapidement être battu. Car l'entreprise insulaire est en train de monter une centrale de 400 MWh… en Estonie. Membre de l'OTAN et de l'Union européenne, le pays veut à tout prix se déconnecter du réseau russe. *« La centrale que nous construisons dans* ◆◆◆

CLEMENT MAHOUDEAU/RIVA PRESS

Transformer l'électricité produite par des éoliennes en hydrogène, afin de pouvoir le stocker, tel est l'objectif du démonstrateur Jupiter 1000, à Fos-sur-Mer. En combinant l'hydrogène avec le CO_2 capté sur les cheminées industrielles voisines, il produira aussi du méthane.

ce pays, et qui sera mise en service en 2025, est constituée de deux unités de batteries lithium-ion de 200 MW, décrit Jean-Gabriel Steinmetz. *Ce qui va permettre à l'Estonie d'assurer elle-même la stabilité de son réseau pour ainsi se coupler avec le réseau européen et, par ailleurs, de stocker en grande partie l'énergie renouvelable que le pays va produire sur son territoire.* » L'Estonie vise 40 % d'autonomie électrique en 2030 et le 100 % énergies renouvelables (surtout par l'éolien) en 2050. Outre la stabilisation des 50 Hz, les batteries lithium-ion sont donc également destinées à stocker l'énergie produite en excès. Actuellement, ces périodes de pics de production, qui ne correspondent pas toujours à une demande des consommateurs, obligent les gestionnaires à déconnecter temporairement du réseau des éoliennes ou des parcs solaires. De l'énergie perdue, donc. Mais ce problème est en cours de résolution en Californie. Entre 2019 et 2024, la puissance de stockage des batteries y est passée de 770 à 10 400 MW! Et ce n'est qu'un début pour les énergies renouvelables, qui assurent déjà un tiers des besoins de l'État. Plus de 17 000 MW de centrales solaires sont actuellement en projet, et l'autonomie devrait être atteinte en 2045.

LES CHIFFRES

388 TWh
Production d'énergies renouvelables (bois-énergie, éolien, hydraulique, pompes à chaleur, biocarburants, solaire, biogaz, déchets...) en France en 2023.

50,5 TWh
Production d'électricité éolienne terrestre, + 35 % par rapport à 2022.

23 TWh
Production d'électricité photovoltaïque, + 16 % par rapport à 2022.

22 %
Part des énergies renouvelables dans la consommation finale en France en 2023. Objectif en 2030 : 33 %.

L'autre solution de stockage, plus marginale, ce sont les sels fondus, un fluide composé de nitrate de sodium et de nitrate de potassium qui stocke l'électricité dégagée sous forme de chaleur. Il permet notamment d'emmagasiner l'énergie produite à partir de centrales solaires à concentration. Le rayonnement recueilli par les panneaux est transmis au sommet d'une tour où le sel capte la chaleur. Cette chaleur est ensuite turbinée pour produire de l'électricité. Elle peut être utilisée jour et nuit. C'est ainsi que fonctionne la centrale solaire Noor à Ouarzazate, au Maroc, la plus grande du monde avec ses 150 MW.

Le Celtic interconnector, pour relier la Bretagne à l'Irlande

Au-delà de cette gestion sur vingt-quatre heures, les producteurs se posent la question d'un pilotage sur plusieurs jours. Cette fois-ci, c'est l'hydrogène qui est envisagé. Le *power to gas* consiste à transformer l'électricité en excès en hydrogène

Des batteries haut perchées

La plus grosse batterie du monde se trouve en Suisse. Elle est rechargée par pompage de l'eau du Léman jusque dans le lac de l'Hongrin, 880 mètres plus haut. En faisant le trajet inverse, sous l'effet de la gravité, l'eau entraîne des turbines qui produisent de l'électricité. Capacité : 100 GWh ! Elle se fera doubler en 2026, lorsque le champion sera australien : Snowy 2.0 stockera 350 GWh. Ces stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) représentent quelque 95 % des capacités mondiales de stockage de l'électricité. La France en exploite six, totalisant 103,5 GWh.

Les sites montagneux propices à l'installation d'une STEP ne sont pas légion. Mais d'autres pistes sont explorées. À Saint-Denis-de-la-Réunion, EDF prévoit d'installer une « STEP marine ». Un bassin perché à 300 mètres d'altitude y stockera l'eau pompée dans l'océan Indien. En Colombie, la start-up française StepSol va installer une micro-STEP en circuit fermé utilisant des poches souples comme réservoirs. Raccordée à des panneaux solaires, elle alimentera un village isolé. À Londres, RheEnergise entend remplacer l'eau par un liquide pâteux d'une densité 2,5 fois supérieure afin de réduire de 60% le dénivelé nécessaire… Mais la gravité s'applique aussi aux solides. D'où l'idée de hisser des blocs à l'aide d'un moteur électrique réversible, puis de les faire redescendre en faisant jouer à celui-ci le rôle de générateur. La jeune pousse helvétique Energy Vault a livré une première installation (100 MWh) à Rudong, près de Shanghai : dans un bâtiment haut de 120 mètres, une grue stocke en hauteur des briques de 35 tonnes et les « relâche », à la demande. Même principe, mais en sous-sol, avec une première installation prévue en Finlande par la start-up écossaise Gravitricity, sur un puits de mine désaffecté de 530 mètres de profondeur. Enfin, la texane Quidnet Energy remplace la gravité par la pression. Pour charger sa batterie, elle injecte de l'eau sous très haute pression dans un réservoir géologique. Aux Pays-Bas, Ocean Grazer veut transposer le principe sous la mer, au pied d'éoliennes offshore, en forçant de l'eau dans des poches flexibles posées sur le fond marin et donc soumises à haute pression. L'énergie stockée est restituée quand l'eau retourne, via des turbines, vers des réservoirs rigides basse pression. **PIERRE VANDEGINSTE**

ENERGY VAULT

Près de Shanghaï, un bâtiment de 120 mètres abrite des briques de 35 tonnes dont la chute, contrôlée, produit de l'énergie.

vert via des électrolyseurs *(lire aussi p. 42-45)*. À Fos-sur-Mer, le démonstrateur Jupiter 1000, géré par GRT-gaz, fonctionne depuis 2021. En Corse, le programme Alchymiste est dirigé par Corsica Sole à partir de sa centrale solaire de Folelli, où l'énergie produite en excès est transformée en hydrogène alimentant les centrales à gaz naturel de l'île et quelques véhicules. Dans d'autres cas, l'hydrogène ainsi obtenu peut être retransformé en électricité (*power to gas to power*). La solution, toutefois, fait débat. « *La technologie ne sera probablement pas mature à grande échelle avant 2040,* estime Pierre Le Romancer, responsable des programmes de recherche sur le stockage à EDF. *Et surtout, les rendements sont très mauvais, car on perd 70 % de l'énergie produite au cours du processus.* » « *Il ne faut pas oublier que c'est de l'énergie de toute façon perdue, et qu'elle n'a donc pas de prix,* rétorque Jean-Gabriel Steinmetz. *Sur quelques heures, les batteries restent les plus compétitives, mais sur des périodes plus longues, l'hydrogène devient rentable.* » La démonstration reste cependant à faire, et les ingénieurs du secteur attendent beaucoup du bilan de Jupiter 1000, fin 2024.

Enfin, la gestion du réseau s'effectue désormais à l'échelle européenne. Tous les pays de l'ouest de l'Europe sont interconnectés, si bien qu'une production excédentaire peut être évacuée vers une zone déficitaire. Deux exemples : le Celtic Interconnector, une liaison électrique de 575 kilomètres, reliera en 2027 la Bretagne à l'Irlande pour acheminer en France les excédents des grands parcs éoliens celtiques. Et les parcs espagnols alimenteront l'Allemagne via l'hydrogénoduc H2Med-BarMar prévu entre Barcelone et Marseille, qui se poursuivra par le système Hy-Fen, de cette ville à la frontière allemande.

Des réseaux flexibles, des interconnections à l'échelle du continent, des consommateurs acteurs, des capacités de stockage rentables : les heures nocturnes et les faiblesses du vent ne sont plus des obstacles à la fourniture d'une électricité produite sans gaz à effet de serre. **LOÏC CHAUVEAU**

EDF

« LA TECHNOLOGIE DU "POWER TO GAS", SOIT LA CONVERSION DE L'ÉLECTRICITÉ EN HYDROGÈNE VERT, NE SERA PAS MATURE À GRANDE ÉCHELLE AVANT 2040 »

Pierre Le Romancer, responsable des programmes de recherche sur le stockage, EDF

Biométhane : le gaz sans l'effet de serre

L'avenir du gaz fossile, dit « naturel », est derrière lui. Issu de sources renouvelables, le biogaz est appelé à le remplacer avec, à la clé, un meilleur bilan carbone et une indépendance énergétique accrue.

Les « gaziers » parlent de « troisième révolution ». *« Au XIXe siècle, le gaz de ville était produit par des usines à charbon au cœur même des agglomérations françaises. Puis, au cours du XXe siècle, il est devenu moins cher d'importer du gaz naturel de Norvège, d'Algérie ou de Russie. Avec le biométhane, on revient à une production locale totalement indépendante des aléas géopolitiques »*, résume Thierry Trouvé, ex-directeur général de GRTgaz. Selon le scénario du gestionnaire national du réseau de gaz, la consommation va diminuer de 470 à 320 térawattheures (TWh) dans les trente-cinq prochaines années. Pourquoi ? Parce que l'électricité va s'y substituer de plus en plus. Ainsi, le chauffage au gaz qui équipe encore un tiers des maisons individuelles et la moitié de l'habitat collectif va être peu à peu remplacé par des pompes à chaleur. Et le gaz naturel va être supplanté par le biométhane, ou biogaz, qui a l'avantage d'être issu de sources renouvelables : déchets agricoles, lisiers, biomasse, etc. L'utilisation de cette ressource permet de réduire, voire de supprimer, l'usage du gaz fossile, et d'abaisser de 80 % les émissions de gaz à effet de serre de la filière. En 2050, l'Hexagone pourrait ainsi se passer du gaz naturel russe, algérien ou qatari. Grâce à quatre nouvelles sources de « biogaz ».

La méthanisation

C'est la plus mature des technologies. Les déchets verts, les lisiers d'élevage, les boues de stations d'épuration peuvent être traités dans des digesteurs où la matière organique est dégradée par les micro-organismes pour produire du méthane. Les résidus sont épandus dans les champs comme amendement organique. En 2023, cette filière a produit 6 TWh. Un chiffre qui, au rythme actuel, sera multiplié par cinq d'ici à 2030. On dénombre aujourd'hui 695 méthaniseurs et 580 en cours de développement. La plus grande partie de leur production est injectée dans le réseau gazier, pour le chauffage ou la production d'électricité. Mais il existe égale-

PAUL LANGROCK/LAIF-REA

On reproche aux bovins d'émettre lors de leur digestion du méthane, un puissant gaz à effet de serre. Mais leurs déjections servent à produire du biogaz.

ment en France 350 points de ravitaillement pour des véhicules roulant au biogaz. La filière doit cependant faire face à des oppositions locales, notamment pour les grosses unités, en raison des odeurs et du trafic de camions généré. En 2050, la production devrait atteindre 130 TWh.

La pyrogazéification

La pyrogazéification, c'est une imitation en accéléré (quelques heures) du processus de formation du charbon ou du pétrole. Elle consiste à brûler entre 400 et 1 500 °C des déchets solides dans une atmosphère appauvrie en oxygène. Cette combustion produit un mélange de gaz, surtout du méthane, qui est ensuite utilisé pour produire de l'électricité ou de la chaleur, ou directement injecté dans le réseau de distribution de gaz naturel. La matière première est constituée de chutes de l'exploitation forestière et de l'industrie du bois, mais aussi de produits en fin de vie comme des meubles, des tissus, des chiffons, des mousses, des mélanges de matériaux. Ces déchets, dits « combustibles solides de récupération » (CSR), sont aujourd'hui en grande partie enfouis en décharge ou incinérés. Des initiatives voient le jour pour créer de nouvelles filières de collecte et de transformation. Le pilote industriel Gaya, géré par Engie à Saint-Fons, dans le Rhône, teste depuis 2018 un four qui traite du bois issu du secteur de l'emballage, mais aussi des noyaux d'olive, des coques d'amande, des écorces, de la paille non destinée à l'élevage, avec le projet de vendre des unités clés en main aux professionnels de la filière déchets. En mars 2022, Ecomaison, l'organisme chargé de financer la collecte et le recyclage des meubles, et le Syctom, Syndicat mixte de traitement et de valorisation des ordures ménagères en Île-de-France, ont signé avec GRTgaz un protocole d'accord pour valoriser les combustibles solides de récupération et les rebuts de papier des centres de tri, ainsi que les bois traités, vernis ou peints déposés en déchetteries. Le gisement national est estimé à 2,5 millions de tonnes par an. Fin 2022, 49 projets étaient recensés sur le territoire, pour une production de 4,1 TWh. Le potentiel estimé pour 2050 est de 90 TWh.

MARMARA.JEAN CHRISTOPHE

« AVEC LE BIOMÉTHANE, ON REVIENT À UNE PRODUCTION DE GAZ LOCALE ET TOTALEMENT INDÉPENDANTE DES ALÉAS GÉOPOLITIQUES »

Thierry Trouvé, ex-directeur général de GRTgaz

La gazéification hydrothermale

Des déchets humides. Voilà de quoi se nourrit la gazéification hydrothermale : effluents organiques de l'industrie agroalimentaire ou papetière, boues de station d'épuration, de dragage et de curage chargées en polluants divers… et bon nombre de déchets d'origine pétrolière comme les plastiques, solvants, huiles, déchets d'industries chimiques et pétrochimiques et, en général, les reliquats des méthaniseurs qui ne pourraient être épandus sur des terres agricoles. Le procédé consiste à brûler ces matières sous une pression de 250 bars et une température de 400 °C par pyrolyse, ou 700 °C en atmosphère appauvrie en oxygène. Il est bien maîtrisé, mais le passage au pilote industriel débute seulement. GRTgaz a lancé en juillet 2024 un « appel à manifestation d'intérêt » (AMI) auprès des industriels qui voudraient se lancer dans cette filière et sollicitent une aide au démarrage de leur projet. La production devrait atteindre 2 TWh en 2030, 50 TWh en 2050.

LES CHIFFRES

23,3 %
C'est la part du gaz naturel dans le mix énergétique mondial. La production est restée stable en 2023 par rapport à l'année précédente.

Les États-Unis, premier producteur de gaz
avec 25,5 % de la production mondiale en 2023. La production nationale a augmenté de 4,2 % par rapport à 2022.

7 milliards de mètres cubes
de biogaz ont été produits en 2023 dans le monde, soit + 16 % en un an. En 2030, selon l'AIE, la production pourrait quadrupler.

La méthanation

De l'électron au gaz. La méthanation consiste à produire de l'hydrogène à partir d'énergie renouvelable – solaire ou éolienne. Cet hydrogène vert *(lire p. 42-45)* peut être injecté directement dans le réseau de gaz actuel, à des teneurs qui ne peuvent toutefois dépasser 6 % pour éviter la corrosion des tuyaux. Mais il est possible aussi de le combiner avec du CO_2 capté à la sortie de la cheminée d'une usine pour produire un méthane qui est injectable, lui, sans contrainte. Cette solution est testée actuellement par GRTgaz à Fos-sur-Mer, dans les Bouches-du-Rhône. Le pilote Jupiter 1000 récupère l'électricité d'un parc éolien voisin lorsque la production est trop importante et la combine avec le CO_2 d'une usine proche pour faire du méthane de synthèse. En pleine puissance, il a pu injecter 200 mètres cubes par heure dans le réseau gazier. L'intérêt majeur de la méthanation est d'utiliser les électrons produits en excès par les énergies renouvelables les jours de grand vent ou de fort ensoleillement. Électrons dont la quantité est appelée à se multiplier avec la montée en puissance des énergies renouvelables. Le potentiel estimé est de 50 TWh en 2050.

LOÏC CHAUVEAU

Il n'y a pas qu'une façon d'imaginer la transition

Les voies de la neutralité carbone ne sont pas toutes tracées, et des scénarios basés sur des millions de données et d'hypothèses s'essaient à les définir. But de ces exercices d'anticipation : réfléchir... pour agir !

Quelles solutions choisir pour réduire drastiquement l'usage des énergies fossiles afin de limiter le réchauffement planétaire ? À l'aide de scénarios prospectifs faisant appel à des modèles mathématiques, de nombreux acteurs (agences, entreprises, associations…) s'essaient à dessiner l'avenir. Un exercice loin d'être gratuit : la prospective a une vocation politique, car elle entend alimenter le débat public au service de l'action. Ces exercices d'anticipation donnent lieu à des rapports volumineux, comptant souvent des centaines de pages foisonnant de graphiques et de chiffres… et nécessitant quelques clés pour s'y retrouver.

Dès l'abord, une clarification s'impose : la prospective n'est pas une prédiction, ni une prévision ! Même s'ils utilisent des méthodes quantitatives mêlant faits et équations mathématiques, les auteurs de ces scénarios n'ont pas de boule de cristal : le film du futur sera forcément différent de ce qu'ils auront couché sur le papier. Mais ils fournissent un éclairage : si l'on suit telle hypothèse, si l'on prend telle décision, quelle sera la conséquence sur le système énergétique ?

Première question à se poser en présence d'un scénario : qui l'a conçu ? Car tous les acteurs n'imaginent pas le futur de la même façon, ni n'envisagent les mêmes moyens pour parvenir à un même but. Les travaux les plus influents sont publiés par des agences publiques internationales ou nationales, mais aussi des associations. Ainsi, l'Agence internationale de l'énergie (AIE), organisation constituée en 1974 à la suite du premier choc pétrolier pour favoriser la sécurité énergétique, publie tous les ans son *World Energy Outlook,* un rapport annuel très consulté par les experts. Si l'on se limite à l'avenir énergétique de la France, l'Agence de la transition écologique (Ademe) – organisme public – a produit quatre scénarios dans son rapport « Transition(s) 2050 ». Quant à RTE, gestionnaire du réseau d'électricité français, il a été saisi par le gouvernement pour réaliser une large étude sur l'évolution du système électrique, intitulée « Futurs énergétiques 2050 ». Enfin, toujours à l'échelle nationale, l'association négaWatt, qui rassemble des experts de l'énergie, produit régulièrement des scénarios de prospective dont l'objectif est de prouver qu'une France neutre en carbone et 100 % énergies renouvelables sera possible en 2050.

LA PROSPECTIVE N'EST PAS UNE PRÉDICTION. ELLE FOURNIT UN ÉCLAIRAGE : SI L'ON PREND TELLE DÉCISION, QUELLE SERA LA CONSÉQUENCE SUR LE SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE ?

Tout commence par un récit du futur envisagé

Tous quatre ont en commun l'horizon 2050, échéance à laquelle l'Europe, en vertu de la loi européenne sur le climat, devra atteindre la neutralité carbone. Mais ces acteurs ne prennent pas forcément en compte le même périmètre, notamment en ce qui concerne les secteurs étudiés : transports, industrie, bâtiment, agriculture… qui font chacun face à des défis spécifiques. Enfin, si l'Ademe, l'AIE ou négaWatt étudient le système énergétique dans son ensemble, RTE, tout naturellement, se focalise sur le système électrique (sans omettre cependant l'évolution des autres secteurs).

Les scénarios produits par ces différents acteurs du débat peuvent être « exploratoires », c'est-à-dire qu'ils testent des hypothèses à partir de la situation actuelle. Il s'agit par exemple de se demander quelles seront les émissions futures si l'on n'agit pas davantage en faveur du climat. Deuxième voie : des scénarios « contraints », qui imposent des conditions à l'arrivée comme être « neutre en carbone » en 2050, limiter le réchauffement par rapport aux niveaux pré-industriels à 1,5 °C, ou encore constituer un mix électrique composé uniquement d'énergies renouvelables. La différence de résultat entre scénarios exploratoires et contraints illustre les défis à surmonter. Si négaWatt ne ◆◆◆

La vie mode d'emploi... en 2050

L'Ademe a bâti quatre scénarios censés conduire la France à la neutralité carbone en 2050. Reposant sur les mêmes données macroéconomiques, démographiques et climatiques, ils empruntent, pour parvenir à cet objectif, des trajectoires divergentes, correspondant à des hypothèses technologiques, des comportements et des choix de société différents. Nous présentons ici les deux options les plus extrêmes, les scénarios 1 et 4.

ADEME

SCÉNARIO 1
GÉNÉRATION FRUGALE

Une transformation importante des comportements individuels et collectifs basée sur la sobriété.

RESSOURCES
- Frugalité choisie et/ou contrainte
- Agriculture et sylviculture extensives
- Consommation de viande divisée par trois
- 70 % des aliments bio

TERRITOIRE
- Nature sanctuarisée
- Transfert de services administratifs vers les villes moyennes et les zones rurales

MOBILITÉ
- Réduction de l'usage de la voiture et de l'avion
- Modes de déplacement doux favorisés, covoiturage solidaire dans les zones rurales
- 50 % des trajets à pied ou à vélo

HABITAT
- Transformation des logements vacants en résidences principales
- Limitation des constructions neuves et de leur surface
- Rénovation énergétique massive et rapide

TECHNOLOGIE
- Avènement des objets low-tech, robustes et réparables
- Stabilisation des flux de données, de la consommation des data centers

ÉCONOMIE
- Baisse de la consommation
- Développement d'une économie de proximité, relocalisations
- 70 % de l'acier, de l'aluminium, du verre, du papier et des plastiques issus du recyclage

ÉNERGIE
- Demande globale divisée par deux
- Limitation du pétrole à des usages spécifiques
- Réduction de la consommation de gaz, essentiellement renouvelable
- Décarbonation par les puits de CO_2 naturels

SCÉNARIO 4
PARI RÉPARATEUR

Une exploitation accrue des ressources et un recours massif à des technologies encore hypothétiques pour maintenir le mode de vie actuel.

RESSOURCES
- Exploitation massive des ressources naturelles
- Poursuite de l'agriculture intensive
- Consommation de viande quasi stable
- Utilisation à grande échelle de la biomasse en vue d'une valorisation énergétique

TERRITOIRE
- Étalement urbain et artificialisation des sols
- Modification du paysage sylvicole : remplacement des feuillus par des résineux

MOBILITÉ
- Augmentation forte des déplacements : +28% de km parcourus par personne
- Toujours plus de véhicules autonomes
- 20 % des trajets à pied ou à vélo

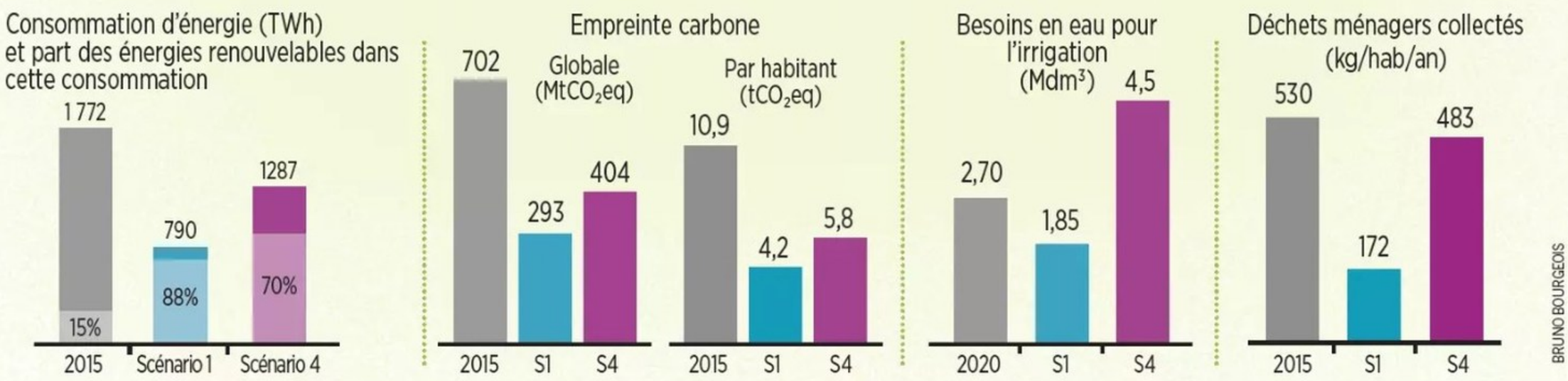
HABITAT
- Maintien de la construction neuve
- Multiplication des équipements technologiques

TECHNOLOGIE
- Innovations tous azimuts
- Intelligence artificielle omniprésente
- Les data centers consomment 15 fois plus d'énergie qu'en 2020

ÉCONOMIE
- Consommation de masse
- Croissance carbonée
- Poursuite des échanges mondialisés
- Recours massif au numérique
- 45 % de l'acier, de l'aluminium, du verre, du papier et des plastiques issus du recyclage

ÉNERGIE
- Demande globale forte
- Importation de gaz
- Utilisation massive de biocarburants
- Captage et stockage géologique du CO_2

EN 2050, UNE DIFFÉRENCE DE TAILLE



BRUNO BOURGEOIS

◆◆◆ propose qu'un scénario, l'AIE en développe trois, l'Ademe quatre (plus un scénario exploratoire), tandis que RTE liste six mix électriques différents, pouvant chacun répondre à trois trajectoires possibles de consommation électrique.

Bâtir un scénario comprend des étapes obligées. Tout commence par un récit qui donne une description qualitative du futur envisagé. Car tout n'est pas que mathématique ! Un travail souvent réalisé en concertation avec les acteurs industriels et de la société civile, généralement mentionnés dans le rapport. C'est le cas pour l'Ademe, qui envisage quatre scénarios *(lire p. 33)* : « Génération frugale », porté principalement par une forte baisse de la consommation d'énergie, parfois contrainte ; « Coopérations territoriales », où la société mise sur une évolution progressive (mais rapide) vers la neutralité carbone ; « Technologies vertes », pour lequel le développement de technologies plus efficaces est le moteur de la transition ; et « Pari réparateur », qui envisage une poursuite des modes de consommation de masse actuels en pariant sur des technologies – pas encore matures – tel le stockage de carbone pour « réparer » les dommages causés à l'environnement.

Trois leviers à activer : sobriété, efficacité et mix énergétique

Ces récits fournissent des hypothèses : données macro-économiques comme l'évolution de la consommation et le niveau d'activité industrielle et économique, évolutions démographiques, politiques mises en place… Mais surtout, ils évaluent l'éventail des solutions déployées, qui reposent dans tous les cas de figure sur trois principaux leviers : la sobriété (l'adoption de comportements qui réduiront la demande d'énergie), l'efficacité énergétique (l'amélioration des équipements existants, permettant de répondre au même besoin avec une moindre quantité d'énergie), et le mix énergétique (la proportion d'énergies renouvelables, de nucléaire…).

L'ampleur et la proportion relative du recours à ces différents leviers est un marqueur important des différences entre scénarios, tout comme la façon dont est évaluée la quantité d'énergie que nous consommerons à l'avenir. Certains travaux se focalisent sur des hypothèses macro-économiques peu ou prou semblables, les solutions étant avant tout fondées sur l'efficacité ou le mix énergétique. Ce sont les options retenues par l'AIE et, dans une certaine mesure, RTE. Dans le cas de l'Ademe, la demande énergétique varie de façon plus contrastée entre le scénario « Générations frugales », qui mise fortement sur la sobriété, et « Pari réparateur », où elle est inexistante. Selon négaWatt, en revanche, une direction est à privilégier : la sobriété, premier levier à activer.

PARMI LES SCÉNARIOS DE L'ADEME ET DE RTE : UNE SORTIE DU NUCLÉAIRE, MAIS AUSSI UNE PROLONGATION DE LA DURÉE DE VIE DES CENTRALES… OU ENCORE UNE RELANCE DU SECTEUR

Quant au mix énergétique, l'association propose de sortir du nucléaire, une option que retiennent aussi certains scénarios de RTE et de l'Ademe. Mais ces derniers envisagent également la prolongation de la durée de vie des centrales actuelles, voire une forte relance du nucléaire. Le nucléaire n'étant qu'un exemple parmi d'autres : plusieurs centaines de technologies différentes peuvent être prises en compte ! Avec pour chacune des données quantitatives comme leur consommation de ressources naturelles, leur efficacité, leur longévité, leur coût, etc.

Ces hypothèses et données nourrissent ensuite les modèles mathématiques, dont les détails ne sont pas toujours publiés intégralement… Néanmoins, tous adoptent une approche technico-économique : ils partent des systèmes techniques. Par exemple, combien une éolienne en mer produit-elle d'énergie, pendant combien d'années et à quel coût ? Cela afin d'équilibrer la production avec la demande en énergie estimée.

Le nombre d'équations en jeu est phénoménal

Ces modèles peuvent être associés à une approche macro-économique, en termes de croissance, d'activité, d'emplois. Et comporter des modules : bâtiment, transports, utilisation des sols (afin d'évaluer, entre autres, la quantité de carbone pouvant être stockée dans les sols ou les forêts, les potentiels conflits d'usage des terres entre agriculture et production d'énergie à partir de la biomasse), utilisation de matériaux (lithium pour les batteries de véhicules électriques, etc.). Bref, le nombre d'équations en jeu est phénoménal. Mais attention : le modèle ne doit pas devenir aussi complexe que le système modélisé, au risque de ne plus pouvoir être interprété ! Aussi, à chaque étape, des discussions et des analyses questionnent, par exemple, l'opportunité de déployer tant de panneaux photovoltaïques dans un temps donné, ou avec tant de ressources.

Impossible d'énumérer les résultats, tant ils sont divers et nombreux. En France, toutefois, quelques grandes lignes sont communes aux scénarios de l'Ademe, de négaWatt et de RTE : l'électrification des usages, le fort déploiement des sources renouvelables – même dans le cas d'une relance du nucléaire – et la réduction de notre consommation globale d'énergie. Tous s'accordent sur un dernier point : il faut agir sans tarder.

SYLVAIN GUILBAUD

Alors que plus de 100 000 hectares de forêt brûlaient en Grèce en août 2021, certaines installations électriques ont dû être fermées par précaution.

ANGELOS TZORTZINIS/ ZUMA PRESS/REA

Les réseaux à la merci du changement climatique

Ouragans, sécheresses, inondations, incendies… Ces épisodes extrêmes perturbent déjà la production d'énergie. Contre leur multiplication annoncée, des parades s'organisent.

L'énergie, cause et victime du réchauffement climatique ? Pas de doute : l'utilisation des ressources fossiles pour la production d'énergie a un impact majeur sur le climat. Mais, à l'inverse, celui-ci a des répercussions sur la disponibilité de l'électricité. Or, en 2050, 90 % de celle-ci devra être produite à partir d'énergies renouvelables (EnR) si l'on veut maintenir l'augmentation de la température mondiale sous le seuil des 2 °C.

Un défi gigantesque, d'autant que la demande pourrait exploser dans les prochaines décennies, notamment parce que la hausse des températures entraînera davantage de besoins en climatisation. Selon une étude de 2023 publiée dans *Nature Energy,* la consommation électrique nécessaire à la climatisation dans les villes européennes pourrait en effet grimper par moments de près de 400 % ! « *En 2050, la température annuelle pourrait avoir augmenté globalement de 2 à 3 degrés,* alerte l'expert de l'université de Princeton, aux États-Unis, Amarasinghage T. D. Perera, qui étudie l'impact du réchauffement climatique sur la production d'énergie. *Mais jour par jour, voire heure par heure, elle pourrait augmenter de 5, voire 10 °C. Même chose en hiver, avec des pics de froid qui multiplieront la demande de chauffage.* » Ces hausses ponctuelles très fortes viendront s'ajouter à une croissance régulière des besoins énergétiques, qui, en 2050, pourraient avoir augmenté de 50 % par rapport à aujourd'hui, selon l'Agence internationale de l'énergie.

Voilà pourquoi il faudra produire davantage, tout en remplaçant les sources traditionnelles par des alternatives renouvelables comme le solaire ou l'éolien, plus écologiques, mais aussi plus dépendantes… du climat. Le solaire, par exemple, ◆◆◆

◆◆◆ perd en efficacité lorsqu'il y a davantage de nuages – une situation que pourraient connaître certaines régions aujourd'hui très ensoleillées, telle la péninsule Arabique, où le nombre de jours gris pourrait doubler d'ici à 2050. Alors que d'autres parties du monde, comme l'Europe, verraient le ciel se dégager plus souvent et pourraient donc mieux exploiter l'énergie solaire. « *Mais n'oublions pas que, lorsque la température augmente de 0,5 °C, le rendement des panneaux photovoltaïques diminue de 0,2 à 0,3 %*, précise Raúl Cordero, expert du réchauffement climatique à l'université de Santiago du Chili. *À grande échelle, cela représente de grandes pertes de production.* »

Les éoliennes à l'arrêt si le vent souffle à plus de 90 km/h

L'éolien aussi pourrait être touché, puisque certaines zones du globe seront moins ventées, avec notamment une baisse de 10 % du potentiel en Europe et en Amérique du Nord. Mais il y aura davantage de vent ailleurs sur la planète. Ceci pourrait-il compenser cela ? Pas sûr. Ces vents plus fréquents sont attendus principalement dans des zones moins peuplées et disposant de peu d'infrastructures éoliennes, telles que les régions polaires et les tropiques.

Quant à l'énergie hydraulique, elle représentait en 2015 plus de 70 % de la production mondiale d'EnR. « *Les centrales hydroélectriques sont importantes car elles agissent comme des batteries géantes, disposant d'un grand potentiel de production pour les moments où la demande est forte* », explique Adrienne Marshall, hydrologue à l'École des mines du Colorado, aux États-Unis, qui ajoute que cette source d'énergie peu polluante et bon marché subira aussi les effets du réchauffement : « *D'abord, parce qu'il est possible que le régime des précipitations change, mais ces évolutions sont difficiles à prévoir. D'autres phénomènes sont en revanche plus certains, tels qu'une raréfaction de la neige, grande pourvoyeuse d'eau au printemps et en été, ainsi que des épisodes de sécheresse, dont la fréquence augmente déjà.* »

PATRICKALLARD/REA

La centrale nucléaire de Chooz, dans les Ardennes, est située au bord de la Meuse, dont l'eau est pompée pour refroidir les réacteurs. En août 2020, le fleuve a vu son débit baisser à cause de la sécheresse, contraignant EDF à arrêter temporairement ces derniers.

Tout comme celle d'autres événements climatiques extrêmes – ouragans, inondations et feux de forêt. « *Même les scénarios les plus optimistes en prévoient davantage* », rappelle Luo Xu, qui étudie la résilience des systèmes énergétiques face au changement climatique à l'université de Princeton, aux États-Unis.

Aux États-Unis, par exemple, les coupures de courant causées par de tels événements ont augmenté de 78 % entre la première et la deuxième décennie de ce siècle, et représentent 80 % de tous les black-out électriques du pays. Affectant notamment les énergies renouvelables, plus exposées. « *L'année dernière, l'ouragan Hillary, de catégorie 1, donc assez faible, a pourtant causé une baisse considérable de la production d'énergie solaire en Californie, qui est passée de 15 000 à 5 000 mégawatts par jour*, précise-t-il. *Il a provoqué la formation d'une immense structure nuageuse qui a atténué le rayonnement solaire, à quoi sont venus s'ajouter les dommages causés aux infrastructures photovoltaïques.* »

La fréquence et l'intensité des ouragans et autres cyclones tropicaux vont probablement augmenter, affectant la production d'énergie solaire, mais aussi éolienne. Car, par mesure de sécurité, ces turbines sont programmées pour s'arrêter lorsque le

vent dépasse une certaine vitesse, en général 90 km/h – moins que les vents d'un ouragan de catégorie 1, qui excèdent les 100 km/h.

Ces impacts combinés sur la production d'énergie pourraient devenir la norme, car la multiplication de ces événements climatiques va en amplifier les conséquences. Exemple : la montée des eaux pourrait par moments s'emballer à cause d'orages, provoquant sur les côtes des inondations plus fortes qu'aujourd'hui. Et il y aura davantage de cyclones tropicaux suivis de vagues de chaleur, qui pourraient donc frapper en plein black-out électrique. « *On peut aussi penser aux feux de forêt, qui se déclenchent souvent après une vague de chaleur. Ils peuvent endommager les infrastructures énergétiques au moment où la demande en électricité est au plus haut à cause des besoins de climatisation* », prévient Amarasinghage T. D. Perera.

Comment refroidir les réacteurs nucléaires avec de l'eau chaude ?

L'énergie nucléaire ne sera pas épargnée non plus. Peu polluante pour ce qui est des gaz à effet de serre, elle nécessite en revanche beaucoup d'eau : entre 1500 et 3000 litres pour chaque mégawattheure généré. « *Outre de l'électricité, les centrales nucléaires produisent de la chaleur. Leur inertie thermique est beaucoup plus élevée que celle des centrales thermiques fonctionnant avec du gaz ou du charbon. Elles ont besoin d'eau pour éliminer cette chaleur résiduelle et refroidir les réacteurs afin d'éviter que le cœur ne fusionne* », rappelle Joana Portugal Pereira, professeure de planification énergétique à l'université fédérale de Rio de Janeiro, au Brésil. Par ailleurs, pour une hausse de 1 °C de la température mondiale de l'air, celle de l'eau augmentera de 0,6 à 0,8 °C. Qui dit eau plus chaude dit moindre efficacité des réacteurs nucléaires, par modification du cycle de Carnot (qui définit la quantité d'énergie motrice produite en fonction du transfert de température : plus l'eau qui reçoit l'énergie est froide, plus le transfert est efficace). Or, les centrales ne peuvent relâcher dans l'environnement une eau trop chaude, car sa moindre teneur en oxygène peut avoir des conséquences sur la biodiversité. Entre 2010 et 2019, près de 4000 pannes de centrales nucléaires ont été causées par des événements météorologiques, notamment des vagues de chaleur obligeant à stopper les réacteurs. Sans compter qu'en période de sécheresse, il n'y a tout simplement pas d'eau pour assurer leur fonctionnement.

D'autant que 40 % des centrales nucléaires dans le monde sont localisées sur les côtes (précisément à cause de leurs besoins en eau), ce qui les expose à la montée des eaux, aux cyclones et aux tsunamis. « *Pour améliorer la sécurité, il faut des investissements lourds. Par exemple, on construit sur la côte est du Japon des murs de 15 à 20 mètres en prévention de potentiels tsunamis, ainsi que des systèmes alternatifs de refroidissement. Mais cela coûte cher,* avertit Joana Portugal Pereira. *Et la plupart des centrales en construction – ou planifiées – sont localisées dans des zones très exposées à la hausse des températures, comme le Moyen-Orient, sans que les risques liés soient toujours pris en compte.* »

Tous les modes de production d'énergie du futur seront donc rattrapés par le changement climatique. Mais les experts réfléchissent à des solutions. « *Le nucléaire n'est pas la panacée, mais on peut diminuer les risques en diminuant la taille des réacteurs* », propose la chercheuse *(lire p. 47-51)*.

UFRJ

« DE NOMBREUSES CENTRALES EN CONSTRUCTION SONT SITUÉES DANS DES PAYS TRÈS EXPOSÉS À LA HAUSSE DES TEMPÉRATURES, SANS QUE LES RISQUES SOIENT TOUJOURS PRIS EN COMPTE »

Joana Portugal Pereira, professeure de planification énergétique, Rio

L'hydroélectrique peut aussi devenir plus résilient s'il est interconnecté : « *Comme à travers l'ouest des États-Unis, où l'impact des sécheresses est atténué par la redistribution de l'énergie vers les zones peu affectées* », selon Adrienne Marshall. Le transport de l'énergie d'une zone à une autre peut aussi être mieux sécurisé, par exemple avec des câbles souterrains résistants aux feux de forêt.

Des microréseaux capables de s'activer en cas d'urgence

Sans oublier que les énergies renouvelables autorisent une plus grande souplesse. « *Produire et stocker l'énergie solaire peut se faire chez soi. La production d'énergie peut ainsi être plus résiliente* », explique Luo Xu. Ces microréseaux électriques pourraient s'activer lors d'une urgence, le temps que le réseau principal soit rétabli. Et les variations de disponibilité des énergies renouvelables pourraient être contrebalancées par une plus grande variété des modes de stockage *(lire aussi p. 26-29)*. L'hydrogène vert, généré avec l'excédent des énergies renouvelables par temps calme, pourrait être utilisé pour produire de l'électricité en cas de baisse de production. Sans oublier que d'autres sources d'énergie sont plus résilientes, comme l'énergie géothermique qui exploite la chaleur des sous-sols, dont les structures sont moins exposées aux changements climatiques. « *Je suis optimiste,* assure Amarasinghage T. D. Perera : *nous avons des solutions scientifiques pour les problèmes que nous affrontons.* » **NICOLAS GUTIERREZ C.**

SOPHIE DUBUISSON-QUELLIER
Sociologue, directrice du Centre de sociologie des organisations à Sciences Po Paris, membre du Haut Conseil pour le climat

« Une société bâtie sur la croissance peut-elle intégrer la sobriété ? »

Proscrire les énergies fossiles ne suffira pas pour bâtir la société du bas carbone, relève la sociologue, pas plus qu'inciter les individus à changer. Car ce sont les politiques publiques et l'économie qui donnent le la.

Notre société est très dépendante du pétrole, du gaz, du charbon. Comment en sommes-nous arrivés là ?
La société s'est construite depuis plusieurs siècles sur l'idée qu'en accédant aux énergies fossiles, elle aurait d'énormes capacités de développement. Dès avant la révolution industrielle, on pense ainsi un progrès continu de la civilisation dépendant de la technique, qui doit permettre au plus grand nombre d'accéder aux produits fabriqués.
Mais s'ouvre alors une spirale. On produit beaucoup, on a besoin de transporter, donc on utilise beaucoup de ressources naturelles. Et parce qu'on produit beaucoup, il faut alimenter une consommation, voire une surconsommation, pour laquelle il faut plus de déplacements, qui vont permettre de produire plus et donc d'utiliser plus d'énergies fossiles, etc. La société actuelle est le produit de ce qu'on appelle une dépendance au chemin : les décisions prises contraignent fortement les suivantes. Il est très difficile de sortir de cette trajectoire. Un exemple : le recours aux énergies fossiles a permis l'hypermobilité. Comment espérer conserver l'hypermobilité sans les énergies fossiles ?

Mais aurait-on pu anticiper cette spirale ?
C'est la deuxième dimension importante mise en lumière par les historiens : lorsqu'on dit « on ne pouvait pas savoir », c'est faux. Dès qu'on a commencé à utiliser le bois des forêts de manière intensive, certains se sont demandé : n'est-on pas en train de détruire ce capital et même de modifier le climat ? C'est une réflexivité à bas bruit, parce que ce qui compte alors, c'est le développement.
Mais ce type de questionnement a abouti notamment au fameux paradoxe de l'économiste anglais William Jevons au XIXe siècle : plus on améliore l'efficacité d'une ressource, plus celle-ci est utilisée. Plus nos lampes sont économes en énergie, plus on en installe… C'est l'effet rebond, tout à fait vérifié sur l'énergie.

Aujourd'hui encore, cette réflexion sur l'utilisation des ressources est écartée, décrédibilisée – « on ne va pas retourner à l'âge de pierre ». Ou encore intégrée dans la logique dominante – « on trouvera toujours des solutions techniques ». Selon une formule bien contemporaine : « On saura toujours s'adapter. » Ce qui est faux, ou, en tout cas, n'est pas vrai pour tout le monde.
Cette lecture de la situation à partir des sciences sociales est bien différente de celle des experts convoqués pour parler sur le climat. Leur diagnostic est extrêmement robuste, clair, puissant : le problème, ce sont les émissions de CO_2. Et donc, quelle est la solution ? Diminuer ces émissions. Et l'on a toute une série de remèdes, évidemment très convaincants, eux aussi : les énergies renouvelables, la sobriété, l'efficience.

Elles ne seraient donc pas la solution ?
D'un point de vue politique et social, cela ne veut pas dire grand-chose : il n'existe pas un « bouton de décision » de réduction des émissions. Surtout, aucune de ces solutions ne peut s'insérer dans la trajectoire telle que je l'ai décrite, une trajectoire de production de CO_2. Pour prendre un exemple, nos sociétés ne savent donner une orientation aux événements qu'à partir d'un certain nombre d'outils, notamment des indicateurs de richesse comme le PIB, qui encouragent la production. Par quel miracle une société structurellement construite autour de la croissance de la production va-t-elle intégrer la sobriété ?

La trajectoire peut éventuellement ralentir un peu, conjoncturellement – la guerre en Ukraine – ou à la marge, par les changements de comportements individuels. Mais on ne voit pas comment elle bifurquerait sans toucher au gros mécano de notre société. Les solutions sont surtout socio-économiques et politiques, pas seulement techniques.

Gouverner les conduites, Presses de Sciences Po, 2016

La Consommation engagée, Presses de Sciences Po, 2018

VÉRONIQUE HUON/SCIENCES PO

Vous dites que les comportements individuels sont peu efficaces ?
On demande à chacun de faire des efforts, mais dans un contexte où il reste encouragé à consommer. C'est une façon d'intégrer des objectifs environnementaux, mais avec une mise en question assez minimale de ce qui doit être changé.
De plus, il faut le répéter, c'est une vision extrêmement naïve du changement. C'est comme si l'on racontait l'histoire de l'automobile en disant : « Un jour, quelqu'un a conduit une automobile, son voisin l'a imité, puis tout le village, puis la ville d'à côté. Et c'est pour cette raison que les constructeurs ont décidé de construire des voitures et les pouvoirs publics des routes. » C'est bien l'inverse qui s'est passé, l'offre automobile et les aménagements routiers ont permis l'accélération de l'usage de l'automobile. Mais on nous tient le même type de discours pour l'énergie. Comme si l'on imaginait que l'on peut modifier le système énergétique à partir du compteur de chacun, alors que la production, le marché sont organisés de manière descendante, très technocratique.
Les modes de vie ne s'imposent pas d'eux-mêmes. Ils s'inscrivent dans une trajectoire, résultent de stratégies industrielles, de politiques publiques : aménagement du territoire, soutien à l'industrie, au commerce, primes à la casse... Avec le consentement, d'ailleurs, d'une partie de la population. On associe développement économique et bien-être individuel. Les entreprises y trouvent leur compte. Et l'on veut le dernier modèle...

C'est une question de représentation ?
De statut social. Et ce n'est pas ancré dans la nature humaine ! Ce sont des stratégies marketing : on a collectivement construit l'idée que pouvoir s'offrir un certain nombre de produits permet de vérifier que l'on s'en sort bien dans la vie.
Les individus sont tous pris dans ce système. Bien sûr, on peut y échapper, mais c'est d'autant plus facile que l'on en a déjà bénéficié, qu'on a les moyens de financer un véhicule électrique, d'installer une pompe à chaleur. De galérer à vélo, parce que cela aussi, on peut le reconvertir en marqueur de statut social ! Mais cela ne concerne qu'une toute petite partie de la population. Pour les autres, c'est au contraire l'aspiration qui fonctionne : moi aussi, j'espère pouvoir un jour atteindre tel et tel niveau. Les « gilets jaunes », dépendants de la voiture, ont pris de plein fouet cette idée qu'il suffit d'un peu de volonté pour contribuer à résoudre le problème du climat par ses comportements. Alors qu'ils étaient la démonstration vivante que c'est une question d'accessibilité sociale, matérielle, économique à ce mode de vie bas carbone qui est présenté comme le modèle à suivre mais qui, en réalité, est aujourd'hui réservé à une élite. Et on leur a renvoyé l'idée qu'ils étaient de mauvais citoyens, selon une conception extrêmement morale.
Ce n'est pas un hasard, cette façon de renvoyer les individus à leurs choix, à leurs responsabilités. C'est, d'une certaine façon, éviter d'engager des changements plus systémiques. Cela finit par produire des formes d'inaction et de blocage, et cela verrouille, parce que des clivages sont créés : les bons et les mauvais. L'écologie devient affaire d'opinion, alors qu'elle doit être un enjeu collectif.

La question est inévitable : que faut-il faire ?
Revoir les institutions, l'aménagement du territoire, le développement économique... Individuellement, on peut agir par le vote, mais aussi dans tous les systèmes organisés dans lesquels on est pris, les espaces de travail, les syndicats de copropriété, les mondes professionnels, les entreprises…. Tous les endroits où l'on peut essayer de modifier des règles. Ce qu'on fait aujourd'hui ne convient pas, c'est évident. Mais j'insiste : c'est aussi contre-productif. On perd du temps. Et l'on est en train de donner beaucoup d'arguments aux défenseurs du *statu quo*, ceux qui ont une forte capacité de décision et qui, par leurs postes, leurs investissements, sont les bénéficiaires de la société du carbone.

PROPOS RECUEILLIS PAR FLORENCE LEROY

Les TECHNOLOG de la transition

L'éolien a le vent en poupe… À terre, mais aussi sur les océans, qui offrent des possibilités d'exploitation presque infinies. Des mers où turbineront bientôt d'autres installations destinées, elles, à capter l'énergie des vagues et des courants, voire la différence de température entre les eaux de surface et celles des profondeurs. Mais la transition énergétique s'appuiera aussi sur d'autres sources : l'hydrogène, peut-être moins prometteur qu'annoncé, le biogaz, et le nucléaire, avec le développement de mini-réacteurs capables de produire chaleur et électricité sur mesure.

TUNVARAT PRUKSACHAT/GETTY IMAGES

Deux ingénieurs effectuent des travaux de maintenance sur une éolienne, en Thaïlande.

IES

Les trois défis de l'hydrogène

Énergie clé de l'industrie, l'hydrogène est un désastre écologique. Son avenir passe par une décarbonation, un stockage efficace et sûr, une utilisation dans des piles à combustible performantes. Et des coûts pulvérisés.

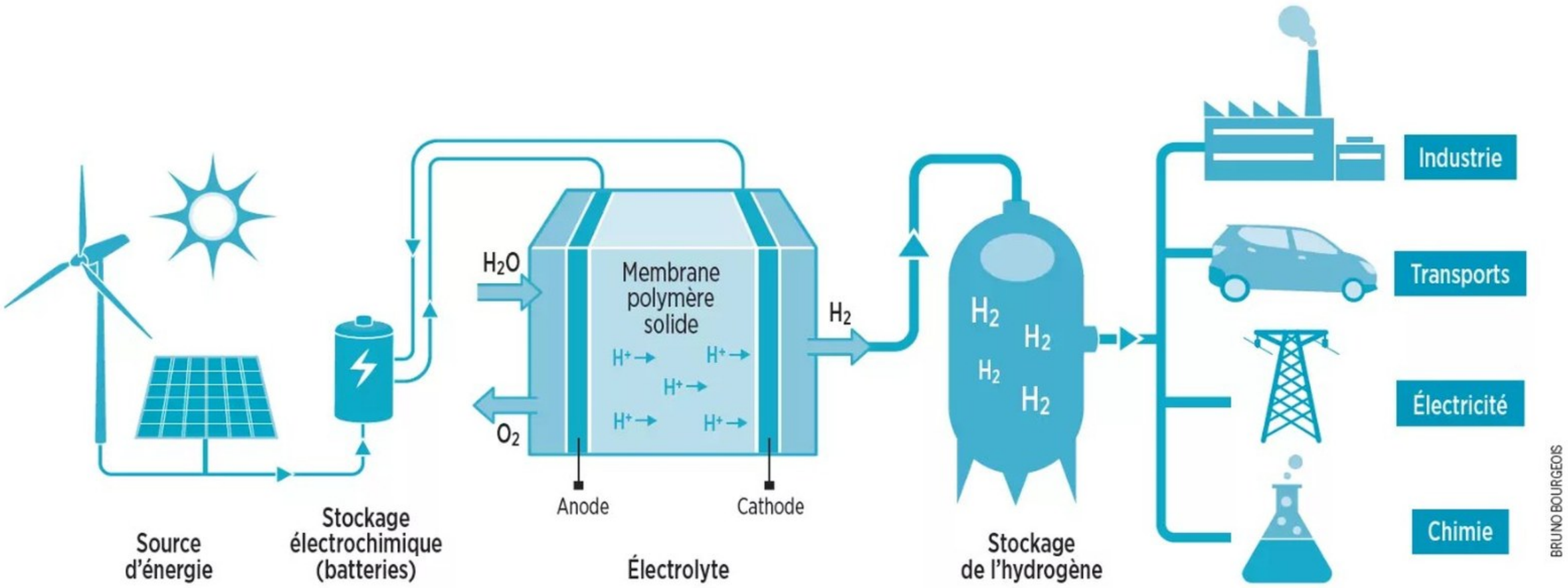
C'est le tout premier élément dans le tableau de Mendeleïev, le plus léger, celui qui est apparu immédiatement après le Big Bang et qui constitue encore les immenses nuages de gaz qui parsèment l'Univers et où se forment les étoiles. Sur Terre, il est partout : avec l'oxygène, l'hydrogène constitue l'eau (H_2O) et se lie à de très nombreuses molécules. Et la planète en produit naturellement, en raison de l'oxydation de roches volcaniques, notamment au fond des océans, ou encore par l'effet de la radioactivité qui casse les molécules d'eau. C'est l'hydrogène dit « blanc ».

Mais sa forme gazeuse composée de deux atomes (dihydrogène, H_2), celle qui intéresse les industriels, est rare dans la nature. Un seul petit gisement, au Mali, est actuellement exploité. En France, plusieurs permis de recherche ont été déposés, mais l'évaluation des stocks réellement disponibles fait débat. L'impact environnemental de son extraction et de sa purification reste aussi à déterminer. C'est pourquoi on doit pour l'instant le fabriquer, en grandes quantités, notamment à partir de gaz naturel, pour de multiples usages : raffinage des produits pétroliers, synthèse de l'ammoniac destiné à l'industrie des engrais par exemple. « *Cet hydrogène est très carboné. Pour en produire 1 kg, on émet 11 kg de CO_2* », explique Luc Bodineau, coordinateur du programme hydrogène à l'Ademe *(lire l'interview p. 46)*. Parfois qualifié de « gris », cet hydrogène industriel devient « bleu » lorsque le CO_2 émis lors de sa production est capté, avec à la clé un bilan carbone un peu meilleur.

Mais ce qui mobilise aujourd'hui les scientifiques et les industriels, c'est l'hydrogène complètement décarboné (« vert »). Car l'hydrogène est une source d'énergie. Injecté à très forte pression avec de l'oxygène dans une chambre de combustion, il permet par exemple de propulser les moteurs principaux de la fusée Ariane 6. Il en existe cependant une application plus courante : la pile à combustible, qui produit de l'électricité à partir d'hydrogène, mis là encore en contact avec de l'oxygène, le plus souvent celui de l'air, et qui n'émet que de la vapeur d'eau. Idéal… sur le papier. De toutes tailles, elles sont capables d'alimenter des usines, des trains, et même certains taxis à Paris. La filière peine toutefois à émerger, du fait d'une demande encore trop faible. Une nouvelle réglementation, plus stricte, sur les émissions de gaz à effet de serre devrait la stimuler. Mais cela ne suffira pas : pour espérer un jour utiliser massivement l'hydrogène, la recherche doit relever trois défis techniques majeurs.

GETTY IMAGES

La Dorsale hydrogène européenne, initiative née en 2020, projette pour 2040 un réseau de transport d'hydrogène de 40 000 kilomètres (dont 69 % de gazoducs reconvertis) reliant 21 pays.



1 Produire de l'hydrogène « vert » à grande échelle

L'électricité produite par les panneaux solaires ou les éoliennes est intermittente. Quant à la production nucléaire, elle est parfois en décalage par rapport à la demande. Que fait-on de l'électricité en excès ? On la stocke dans des batteries, on l'utilise pour pomper de l'eau qui fera tourner des turbines hydroélectriques. Ou encore… on l'emploie à fabriquer de l'hydrogène, par électrolyse : dans un réservoir d'eau, on plonge deux électrodes et on applique un courant électrique. *« Les électrons viennent casser la molécule d'eau, ce qui donne du dihydrogène et du dioxygène »*, explique Christophe Turpin, responsable des activités hydrogène du laboratoire Laplace (Toulouse). Ce centre cherche à améliorer électrolyseurs et piles à combustible.

L'électrolyseur a été conçu en 1800 par les Britanniques William Nicholson et Anthony Carlisle. En plongeant dans l'eau (« l'électrolyte ») deux fils de cuivre reliés aux deux bornes d'une pile (les « électrodes »), ils ont observé un dégagement de fines bulles : de l'hydrogène. Mais ce procédé, l'« électrolyse alcaline », a un défaut notable : l'électrolyseur met longtemps à atteindre son plein régime. Il est donc peu adapté à une électricité intermittente.

C'est pourquoi les scientifiques s'attachent à développer une autre technologie – la membrane échangeuse de protons (MEP). Constituée d'un polymère, elle joue le rôle d'électrolyte et sépare l'hydrogène et l'oxygène. Avantage considérable : un régime de croisière très vite atteint. En 2021, la société Air Liquide a installé au Québec un site basé sur cette technologie. Il produit plus de 8 tonnes d'hydrogène par jour, à partir d'électricité hydroélectrique. Une autre technologie d'électrolyseur, dite à « oxyde solide », fonctionne quant à elle à haute température (600 à 800 °C). Elle valorise la chaleur inutilisée dégagée lors de processus industriels.

Mais des problèmes demeurent. *« L'électricité fournie par les sources d'énergie renouvelables comme les éoliennes n'arrive pas de manière régulière. Cela accélère le vieillissement des électrolyseurs. Nous travaillons à lisser la puissance électrique, par exemple en utilisant une batterie qui absorbe les pointes de production et redonne cette électricité à l'électrolyseur quand il y a sous-production*, explique le chercheur. *Un autre enjeu important est la performance et la durée de vie des systèmes auxiliaires, comme les pompes qui font circuler l'eau et captent l'hydrogène et l'oxygène. »* Enfin, les électrodes sont constituées de platine ou d'iridium, qui servent de catalyseurs dans la réaction d'hydrolyse. Des métaux coûteux, dont l'approvisionnement constitue un enjeu stratégique. *« On cherche à réduire la quantité d'iridium, qui reste encore le catalyseur de référence pour l'électrode positive de l'électrolyseur MEP »*, souligne Christophe Turpin. Il est essentiel de développer le recyclage, voire de s'affranchir de ces matériaux. L'électrolyseur AEM, développé par la start-up allemande Enapter, pourrait apporter une solution, car, sans métaux précieux, il combine électrolyse alcaline et technologie MEP. ◆◆◆

L'électrolyse MEP est utilisée pour produire de l'hydrogène « vert » à partir d'eau et de sources d'énergie intermittentes. Contrairement à l'électrolyse alcaline, les électrodes ne sont pas plongées dans un liquide mais séparées par une membrane échangeuse de protons (MEP). À l'anode, le courant électrique casse la molécule d'eau. La membrane bloque les molécules de dioxygène (O_2) issues de cette réaction, mais laisse passer les ions hydrogène (H+). Sous l'effet du champ électrique, ceux-ci migrent vers la cathode où ils se recombinent avec les électrons du circuit pour créer du dihydrogène.

M2S

« UN ENJEU IMPORTANT EST LA PERFORMANCE ET LA DURÉE DE VIE DES SYSTÈMES AUXILIAIRES, COMME LES POMPES QUI FONT CIRCULER L'EAU ET CAPTENT L'HYDROGÈNE ET L'OXYGÈNE »

Christophe Turpin, laboratoire Laplace, Toulouse

2 Stocker efficacement et en toute sécurité

Un litre d'hydrogène gazeux représente, à température et pression ambiantes, une masse de… 83 mg à peine. Pour en stocker ne serait-ce que 5 kg, il faudrait un ballon de 5 mètres de diamètre. C'est pourquoi les rares stations-service qui proposent à leurs clients de l'hydrogène le délivrent sous forme fortement comprimée, à près de 800 bars de pression.

Mais cette petite molécule a une autre faculté : celle de se glisser partout. *« Les réservoirs des véhicules doivent être à la fois résistants et étanches. C'est pour cela qu'ils sont multicouches »*, explique Fermin Cuevas, chercheur à l'Institut de chimie et des matériaux Paris-Est (ICMPE). Une couche de matériau polymère assure l'imperméabilité, tandis qu'une autre, de fibre de carbone mélangée à de la résine époxy, apporte la rigidité. Il faut compter 50 kg de fibre de carbone (à 30 euros le kg) pour un réservoir standard de 120 litres, soit près de 1 500 euros, et rajouter une somme équivalente pour la fabrication. Quant au remplissage du contenant, il revient à près de 3 euros le kg d'hydrogène… *« Comprimer mécaniquement à 700 bars nécessite l'équivalent de 15 % de l'énergie que peut fournir l'hydrogène »*, précise Fermin Cuevas.

À l'usine Iberdrola de Puertollano (Espagne), onze réservoirs géants stockent six tonnes d'hydrogène.

3 Utiliser durablement les piles à combustible

Une pile à combustible c'est, schématiquement, un électrolyseur utilisé à l'envers. Cette fois, on apporte l'hydrogène vers une électrode, et de l'air (contenant de l'oxygène) vers l'autre électrode. Résultat : l'hydrogène se dissocie en un flux d'électrons, qui est capté, et de protons (H+), qui vont se combiner avec l'oxygène de l'air pour former de l'eau, le tout assorti d'un dégagement de chaleur. Les premières piles ont été mises au point au début du XIXe siècle. Mais le succès du moteur à pétrole les a éclipsées. Les technologies récentes ont relancé leur intérêt. Il en existe de toutes les tailles. Les plus grandes, basées sur la technologie dite à oxyde solide, sont statiques et alimentent en électricité des sites industriels ou parfois des immeubles, comme au Japon. D'autres, plus petites, dotées d'une membrane échangeuse de protons (PEMFC), équipent des véhicules légers, telle la Toyota Mirai, lancée en 2014. Annoncée aujourd'hui à partir de 73 000 euros sur le site français de Toyota, sa diffusion reste confidentielle. La Hyundai ix35, sa contemporaine, et plus récemment une Peugeot Expert à hydrogène, sont exploitées notamment par la société de taxis Hype à Paris.

« L'ENJEU EST DE PASSER DES VÉHICULES INDIVIDUELS À DES TRANSPORTS LOURDS, ÉQUIPÉS DE PILES FONCTIONNANT DES DIZAINES DE MILLIERS D'HEURES »

Sylvie Escribano et **Fabrice Micoud,** ingénieurs-chercheurs au CEA

« L'enjeu est de passer des véhicules individuels, avec des piles qui peuvent fonctionner quelques milliers d'heures, à des transports lourds opérant pendant des dizaines de milliers d'heures », soulignent Sylvie Escribano et Fabrice Micoud, ingénieurs-chercheurs au CEA au sein du laboratoire Liten à Grenoble, où l'on étudie les piles à combustible, de l'échelle atomique des matériaux qui les constituent à celle du système complet.

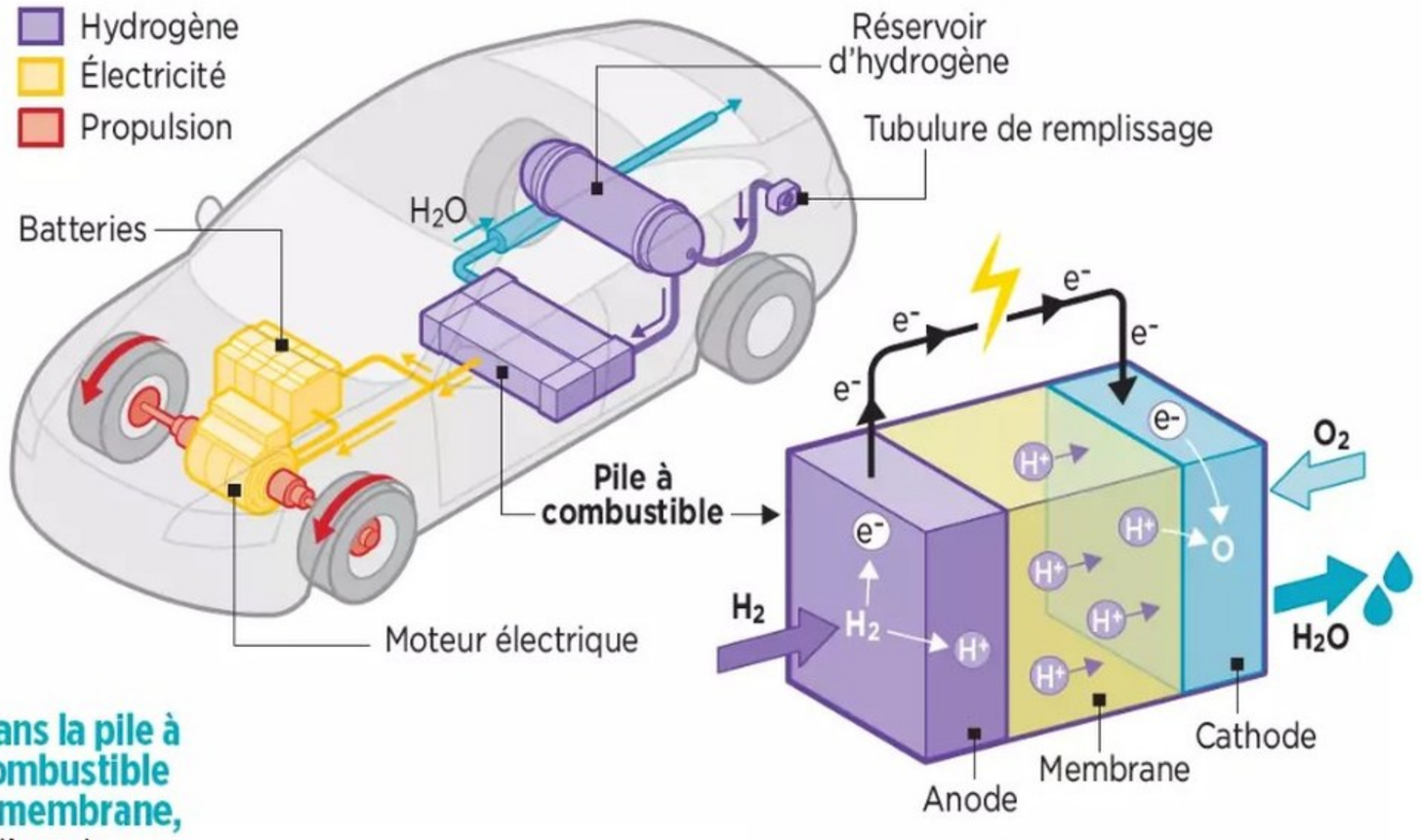
En matière de transports lourds, un TER à hydrogène est annoncé pour 2026. Il circulera dans les régions Auvergne-Rhône-Alpes, Bourgogne-Franche-Comté, Grand Est et Occitanie… alors que les trains du groupe français Alstom circulent déjà en Allemagne depuis 2022. Il s'agit de trains bi-mode,

BERNAT ARMANGUE/AP/SIPA

Autre problème : ce gaz s'enflamme facilement et brûle rapidement. Prévenir toute fuite exige une maintenance rigoureuse des systèmes de remplissage et de leurs jonctions (vannes, joints). Une solution serait de porter l'hydrogène à l'état liquide. Mais il faudrait le refroidir considérablement, puisque son point d'ébullition (sous forme de dihydrogène) se situe à - 252,8 °C. Un procédé réservé au spatial.

C'est pourquoi les recherches se portent sur de nouveaux modes de stockage. *« Certains matériaux peuvent absorber l'hydrogène puis le libérer. Et ce, à température ambiante et pression modérée »,* souligne Fermin Cuevas. Son équipe étudie des matériaux métalliques formés de combinaisons d'éléments chimiques en différentes proportions. Le gaz (sous forme de dihydrogène), mis sous pression à 10 bars, se dissocie en atomes d'hydrogène qui s'insèrent spontanément dans le matériau. Lorsqu'on relâche la pression, aux alentours de 2 bars, l'hydrogène est libéré. Le gaz se reforme et va alimenter par exemple une pile à combustible. Un démonstrateur de 50 kg a été développé dans le cadre du projet européen HyCare. L'expérience a pris fin en 2023, mais les recherches se poursuivent en France (programme Solhyd). Certaines équipes explorent d'autres pistes, comme l'ammoniac ou les LOHC, molécules organiques liquides, également capables de capter et de relâcher l'hydrogène.

Documentaire de Patrick Jütte, « L'hydrogène, miracle ou mirage énergétique », Arte, https://sciav.fr/hydrogene



BRUNO BOURGEOIS

Dans la pile à combustible à membrane, à l'anode, l'hydrogène se sépare en protons et électrons. La membrane laisse passer les premiers et bloque les seconds, qui empruntent un circuit externe, créant un courant. À la cathode, l'oxygène réagit avec les protons et électrons, formant de l'eau. La pile alimente les batteries et le moteur.

qui peuvent s'alimenter en électricité via les caténaires ou en hydrogène quand les lignes ne sont pas électrifiées, ce qui permet de remplacer les polluantes locomotives diesel. Ces moyens de transport arrivent – lentement – sur le marché, l'objectif restant d'améliorer les performances et la longévité, mais aussi de réduire les coûts. *« Il faut maîtriser les conditions de fonctionnement dans les systèmes et les matériaux. Par exemple, dans les piles, nous étudions la couche active, là où se passent les réactions électrochimiques. Les particules de platine qui servent de catalyseur sont déposées sur une structure de carbone. Il faut faire en sorte que les protons et les gaz réactifs y accèdent le mieux possible. Nous cherchons à développer les meilleurs matériaux et à maîtriser les procédés de fabrication »,* précisent les scientifiques.

Le coût des matériaux reste un obstacle majeur. Pour une seule pile, il faut compter de quelques dizaines à une centaine de grammes de platine... à 29 000 euros le kilo. Et la membrane est facturée plusieurs centaines d'euros le mètre carré. Sachant qu'une pile, comme un électrolyseur, est constituée d'un « stack » – un empilement de nombreuses couches, chacune constituée des électrodes et d'une membrane.

Une véritable filière de recyclage de ces piles devra se mettre en place. *« Dans les facteurs limitant l'innovation technique aujourd'hui, il y a aussi le manque de retour d'expérience, en particulier sur la durabilité à long terme des systèmes PEMFC »,* concluent Fabrice Micoud et Sylvie Escribano. **JEAN-FRANÇOIS HAÏT**

ADEME/DR

LUC BODINEAU

Coordinateur du programme Hydrogène à l'Agence de la transition écologique (Ademe)

« L'hydrogène n'est pas une énergie miracle, mais un bon outil de stockage »

Prisé par la chimie, l'hydrogène doit développer sa version verte, intéressante notamment pour le stockage de l'électricité. De nouvelles réglementations devraient encourager son essor.

Où en est aujourd'hui la filière hydrogène ?
L'hydrogène est massivement produit dans le monde pour des applications industrielles comme le raffinage des produits pétroliers ou la fabrication des engrais. Le reste, notamment celui fabriqué par électrolyse, est marginal. Cependant, en France, un arrêté de juillet 2024 limite les émissions de CO_2 issues de la production industrielle d'hydrogène à 3,38 kg de CO_2 par kilo. Jusqu'à aujourd'hui, c'était 11 kg. Cela représente une baisse de 70 %. On s'oriente donc vers une décarbonation massive du secteur.

Qu'en est-il des applications liées à la mobilité ?
On en est aux premières applications en conditions réelles. En France par exemple, en 2023, il y avait – selon l'observatoire de l'hydrogène Vig'Hy – 79 stations-service pour les véhicules, 59 bus en circulation et 955 véhicules légers, pour la plupart des taxis en région parisienne.

La voiture à hydrogène va-t-elle se développer ?
Ce sont plutôt les véhicules lourds qui seront concernés : trains et bus pour le transport de voyageurs et de marchandises, bennes à ordures, navettes fluviales ou maritimes… L'avantage est que la durée d'immobilisation nécessaire pour faire un plein d'hydrogène est d'à peine 10 à 15 minutes. Une opération bien plus rapide que le chargement, pour une autonomie identique, de batteries électriques dont la masse et l'encombrement très importants sont, par ailleurs, un handicap pour un véhicule qui doit transporter du fret. Pour les véhicules particuliers, en revanche, une batterie classique suffit et l'on ne s'attend pas à ce que les voitures à hydrogène se déploient.

La filière ne semble pas décoller. Pourquoi ?
Jusqu'à présent, le goulet d'étranglement, c'était la demande. Mais avec les nouvelles réglementations, il y aura un important effet de levier, les industriels vont devoir s'engager. Il faut ajouter à cela des soutiens publics, en France et en Allemagne, notamment, pour aider les installations bas carbone. En France, un plan Hydrogène a été lancé en 2018. Près de 4 milliards d'euros ont été investis pour amorcer l'usage industriel de ce gaz. Et une stratégie nationale de l'hydrogène a été établie en 2020.

Quelle place l'hydrogène est-il appelé à prendre dans l'offre d'énergies renouvelables ?
Ce ne sera pas une énergie miracle, mais un complément intéressant au stockage de l'électricité excédentaire par les batteries ou via l'hydroélectricité. Le rendement de fabrication de l'hydrogène par électrolyse n'est pas très bon *[60 à 70 % pour les systèmes à pile à combustible PEMFC, 70 à 80 % pour l'oxyde solide actuellement, ndlr]*, mais on peut en stocker beaucoup. Sur une production électrique annuelle de 450 TWh en France, les batteries et les barrages peuvent stocker 1 TWh, l'hydrogène potentiellement 10 à 15 TWh. On peut par exemple injecter ce gaz dans des cavités souterraines qui se sont formées dans des poches de sel imperméables. C'est déjà le cas au Texas. En France, Storengy, filiale d'Engie, développe Hypster, un démonstrateur de ce type de stockage, dans l'Ain.

Quelle est la prochaine étape ?
Des « gigafactories » – usines géantes destinées à la production de masse – sont annoncées ou sortent déjà de terre, notamment en France : McPhy à Belfort, John Cockerill à Aspach-Michelbach (Haut-Rhin), ou Genvia [lancée par le CEA et Schlumberger, ndlr] à Béziers (Hérault) qui fabriqueront des électrolyseurs, le site SymphonHy de Symbio à Saint-Fons (Rhône) pour les piles à combustible, Forvia à Allenjoie (Doubs) pour les réservoirs… Pour assurer le succès de l'hydrogène dans la durée, la fiabilité de ces systèmes sera déterminante.

PROPOS RECUEILLIS PAR J.-F. H.

Les mini-réacteurs modulaires pourraient être fabriqués en série pour produire de l'électricité et/ou du chauffage au plus près des utilisateurs. Ici, une version miniaturisée, le réacteur micromodulaire ou MMR (vue d'artiste).

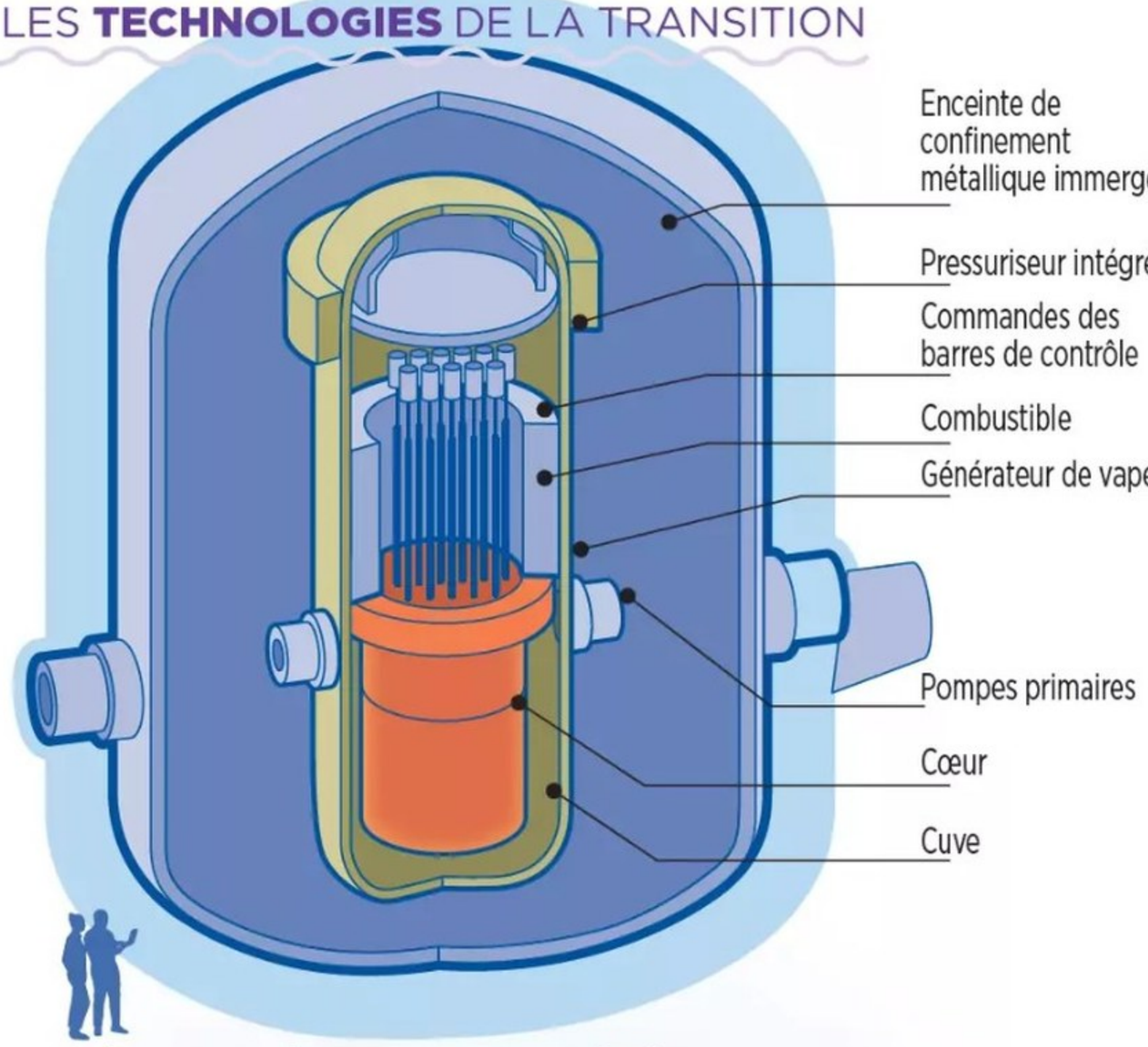
COURTESY: USNC

NUCLÉAIRE MODÈLE RÉDUIT : L'ENVOL ?

Après des décennies de gigantisme, le nucléaire se prépare à faire sa révolution. Des dizaines de start-up imaginent de petits réacteurs à fission, dédiés à la production de chaleur, d'électricité… ou des deux. Revue de détail.

On les appelle « petits réacteurs modulaires » (*small modular reactors,* SMR) et « réacteurs modulaires avancés » (*advanced modular reactors,* AMR). Pourquoi modulaires ? Parce qu'ils peuvent être utilisés seuls ou en grappes, selon les besoins : production de chaleur ou d'électricité, dessalement d'eau de mer, propulsion de cargos… Les SMR sont en quelque sorte des versions réduites des réacteurs actuels, alors que les AMR font appel à d'autres concepts, pour certains expérimentés depuis des décennies. Tous ont en commun de produire de l'énergie par fission : il s'agit de bombarder avec des neutrons de gros noyaux fissiles – par exemple ceux de l'uranium 235 – afin qu'ils se scindent en noyaux plus petits tout en libérant de la chaleur et d'autres neutrons, qui à leur tour provoqueront des fissions. Et tous visent une sécurité passive : ils doivent s'arrêter sans intervention extérieure en cas d'accident ou de coupure d'alimentation.

Dix à cent fois moins puissants que les réacteurs actuels – qui fournissent entre 900 et bientôt, pour l'EPR de ◆◆◆



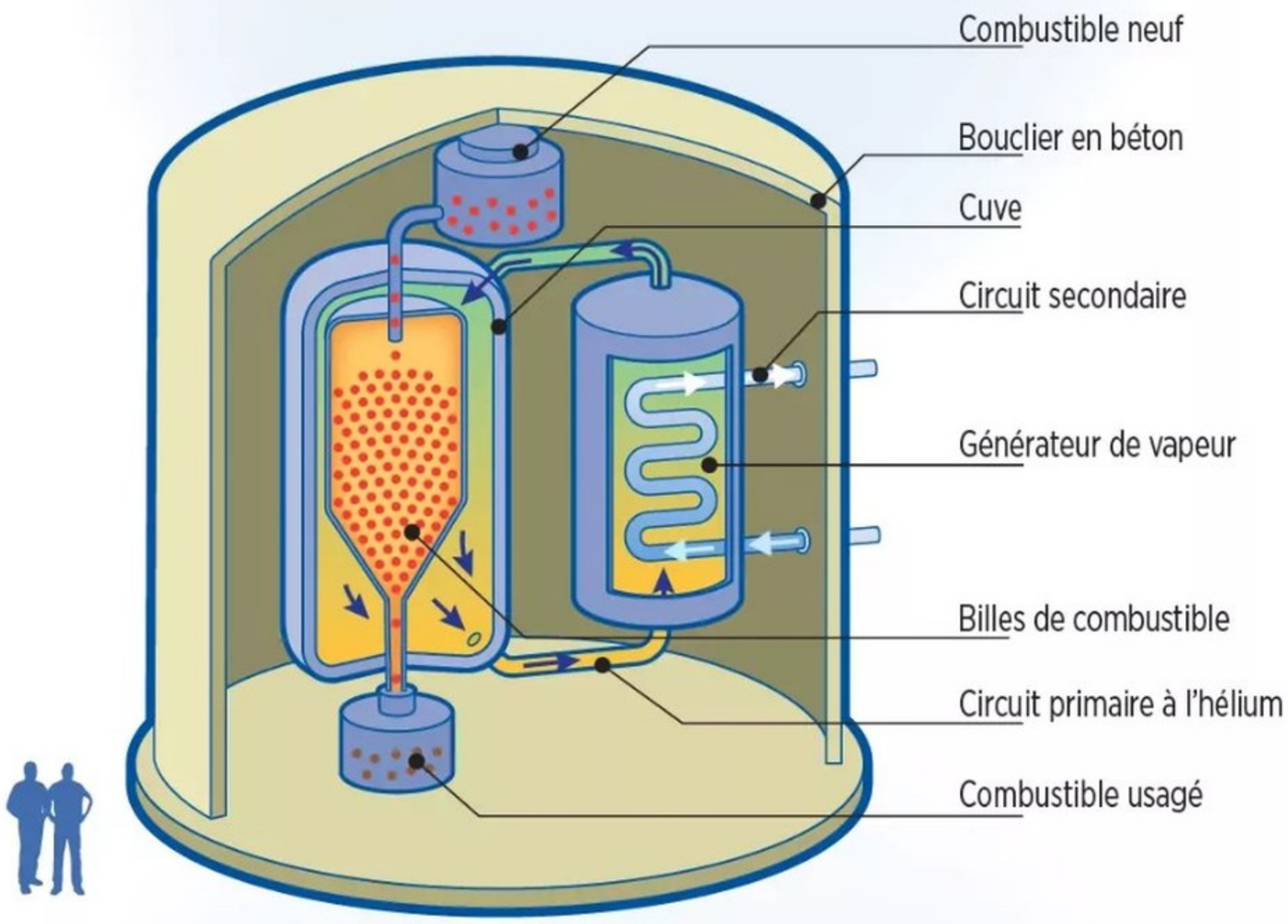
Réacteur à eau pressurisée

Modèle réduit de la filière majoritaire des réacteurs en service à travers le monde, ce type de réacteur utilise comme combustible des assemblages de pastilles d'uranium qui chauffent de l'eau sous pression. La chaleur est convertie en électricité dans des générateurs.

Le plus : une technologie fiable, maîtrisée à l'échelle industrielle, également pour l'approvisionnement en combustible.

Le moins : la génération de déchets radioactifs sur des siècles ; le besoin d'une source froide (fleuve ou mer).

L'écueil : la complexité de construction selon les normes de sécurité modernes.



Réacteur à haute température

Le combustible est constitué de billes – le Triso – où l'uranium est enfermé dans des couches protectrices qui retiennent les produits de fission. Le refroidissement est assuré à l'aide d'un gaz, ici l'hélium, qui transporte aussi la chaleur.

Le plus : une sûreté accrue grâce à la structure du combustible et à une meilleure résistance à la chaleur permettant d'atteindre des hautes températures.

Le moins : la génération de déchets radioactifs à vie longue.

L'écueil : L'approvisionnement en combustible, pour l'instant uniquement fabriqué par quelques pays, mais pas en France.

INFOGRAPHIES : BRUNO BOURGEOIS

◆◆◆ Flamanville, 1 650 mégawatts d'électricité (MWe, ou mégawatts électriques) –, SMR et AMR pourraient, dès la décennie prochaine, être produits par centaines, voire milliers, par assemblage de composants fabriqués en série, en usine, au lieu d'être construits sur site comme les réacteurs actuels. C'est en tout cas ce qu'espèrent les dizaines de start-up qui se sont lancées dans l'aventure ces dernières années, notamment aux États-Unis et en Europe, avec le soutien des pouvoirs publics et des acteurs du capital-risque.

Car l'enjeu est de taille. Des pans entiers de l'industrie pourraient avantageusement utiliser une énergie d'origine nucléaire produite au plus près de leurs installations. SMR et AMR constitueraient en outre un atout pour les pays qui ne disposent pas de vastes réseaux de distribution électrique et pourraient ainsi s'électrifier à moindre coût. Et, partout, ils seraient un avantage en matière d'efficacité énergétique, puisqu'une grande partie d'entre eux sont conçus pour produire non seulement de l'électricité mais aussi de la chaleur, indispensables à de nombreux processus industriels.

Des petits réacteurs nucléaires dédiés à la production de chaleur

Arrêtons-nous un instant sur le fonctionnement d'un réacteur nucléaire classique *(lire aussi les repères p. 15)*. Il fonctionne à une température relativement basse (environ 320 °C) et utilise des neutrons dits « lents » : en entrant en collision avec un modérateur – généralement l'eau sous pression du circuit primaire de chaleur –, les neutrons cèdent à celui-ci une partie de leur énergie, ce qui les freine à une vitesse d'environ 2 km/s. Sans ce ralentissement, ils ne pourraient provoquer efficacement de nouvelles fissions. L'uranium naturel, « carburant » du réacteur, contenant moins de 1 % d'uranium 235, forme fissile de cet élément, il faut en enrichir la concentration, entre 3 % et 5 %.

Mais seule une partie en est consommée. Le combustible usagé contient encore de l'uranium 235, de l'uranium 238, et toute une série d'éléments produits dans le réacteur. Autant de composants traités comme des déchets, mais qui contiennent encore beaucoup d'énergie : près de 99 % de l'énergie nucléaire de départ ! Un vrai gaspillage.

Sécurité : des procédures accélérées, mais pas bâclées

La France a adopté, en juin 2023, une loi d'accélération des procédures liées à la construction de nouvelles installations nucléaires. Mais aussi innovants soient-ils, les réacteurs modulaires devront répondre à toutes les exigences de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). *« Nous ne partons pas de rien*, explique Philippe Dupuy, responsable de la mission Réacteurs innovants de l'ASN. *Toutes ces technologies ont été expérimentées à divers niveaux d'avancement. »* Une première phase permet aux parties de prendre langue, avant une série de réunions thématiques sur les différents aspects des projets. *« On s'assure de la maturité du dossier et de la capacité de l'entreprise à disposer des ressources pour le faire avancer. »* Puis la sûreté du réacteur est étudiée. Enfin, l'ASN instruit la demande de création de l'installation. *« Une étape qui prend au minimum trois ans pour le premier exemplaire d'un nouveau réacteur,* prévient Philippe Dupuy. *Une fois la construction achevée, il reste à obtenir une autorisation de mise en service, pour laquelle on s'assure que tout a été réalisé selon les exigences de sûreté. »* Soit une année supplémentaire… Dans ces conditions, peut-on envisager qu'un réacteur innovant puisse commencer à fonctionner dès 2026, comme certains l'espèrent ? *« On imagine mal que cela puisse se faire avant 2030*, tempère Philippe Dupuy. *Ce n'est pas parce qu'un réacteur est petit qu'il est inoffensif. Nous ne bâclerons pas les instructions. »*

Les réacteurs classiques engendrent une autre forme de gaspillage, de chaleur cette fois. En effet, le rendement final de conversion en électricité ne dépasse guère les 35 %. Autrement dit, près des deux tiers de la chaleur libérée dans le réacteur sont perdus, le plus souvent rejetés dans l'environnement. Sur les 440 centrales en activité dans le monde, une quarantaine seulement sont équipées d'un dispositif de récupération de chaleur, ce qu'on appelle la cogénération – production conjointe d'électricité et de chaleur. Or, nous l'avons évoqué, de nombreux procédés industriels utilisent surtout de la chaleur, aujourd'hui issue le plus souvent de la combustion d'hydrocarbures, et notamment du gaz. Remplacer par exemple des brûleurs à gaz par de l'électricité – même décarbonée – pour chauffer des fours représenterait un immense gâchis. Un petit réacteur nucléaire dédié directement à la production de chaleur serait beaucoup plus efficace.

La quasi-totalité des projets de réacteurs modulaires à l'étude dans le monde misent donc sur la production de chaleur ou la cogénération. En France, pas moins de onze dossiers ont été sélectionnés dans le cadre de l'appel d'offres « réacteurs nucléaires innovants » lancé en 2022 par la Banque publique d'investissements (BPI France) dans le cadre du programme d'investissement France 2030, et doté d'un milliard d'euros. Deux d'entre eux concernent la fusion nucléaire *(lire p. 66)*, neuf la fission. Parmi ces derniers, le projet Nuward d'EDF s'était vu octroyer la part du lion, 500 millions d'euros. Mais l'industriel a annoncé, en juillet dernier, qu'il jetait l'éponge, en raison de retards qui risquaient d'avantager la concurrence. Restent donc huit start-up sur les rangs, qui recevront chacune, dans un premier temps, entre 5 et 32 millions d'euros. Une amorce seulement, puisque chaque premier exemplaire de ces réacteurs modulaires devrait coûter de 300 millions à plus d'un milliard d'euros. Une fois lancée la production en série, les industriels espèrent diviser ce montant par deux ou par trois.

Dossier du site La Radioactivité, https://laradioactivite.com/categories/energie_nucleaire/reacteurs_nucleaires

Un combustible confiné dans des billes d'un millimètre de diamètre

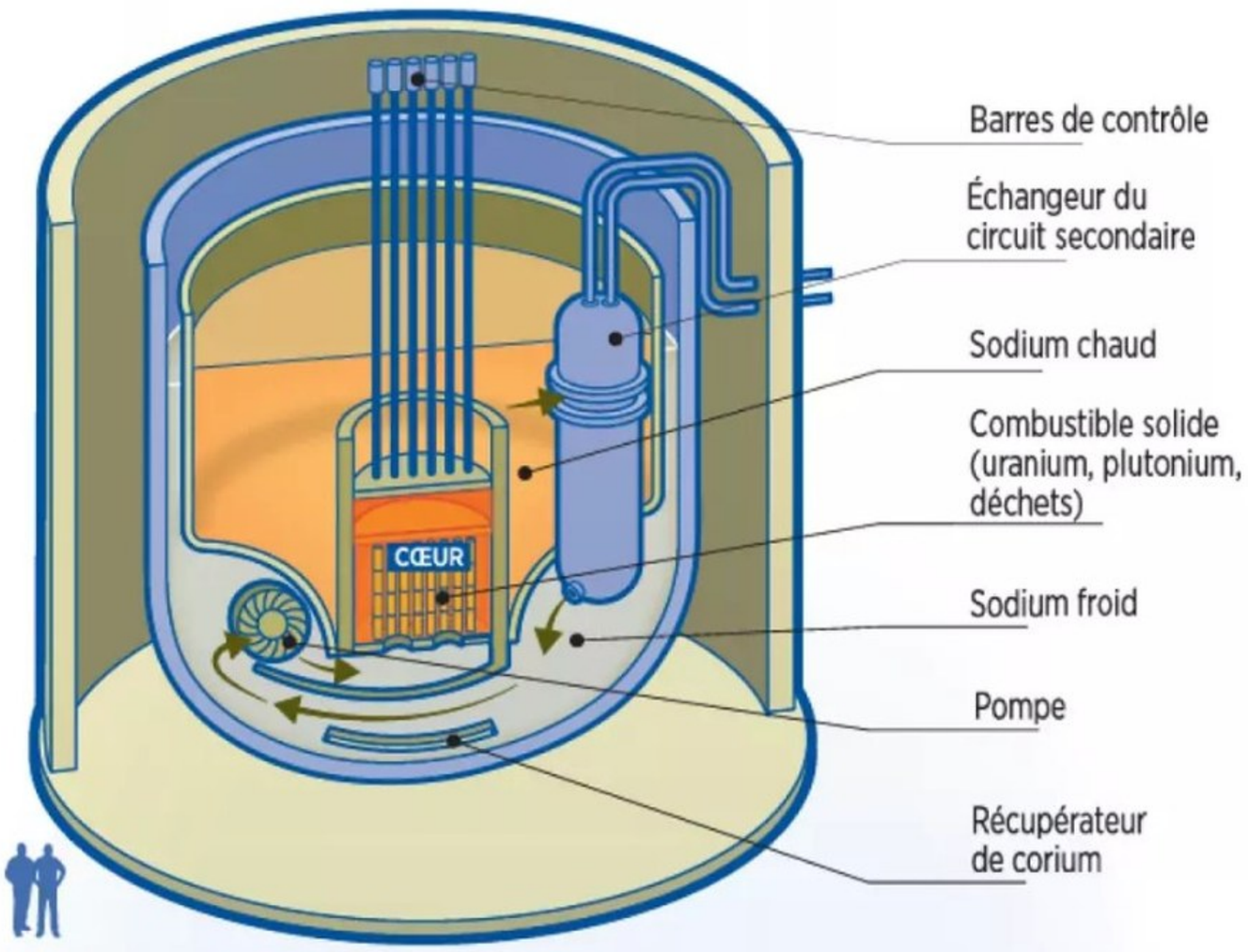
Les projets de SMR diffèrent par le choix de leur combustible, de leur caloporteur – le fluide qui récupère la chaleur produite dans le cœur du réacteur et l'achemine au-dehors – ou encore de leur modérateur. Parmi les défenseurs de la filière à uranium enrichi, on trouve Calogena. Son SMR entend alimenter des réseaux de chauffage urbain avec une eau à 100 °C. C'est un réacteur de type piscine : l'eau assure le refroidissement du cœur, la modération, et sert de barrière contre les radiations. Dans le projet de Calogena, elle n'est pas pressurisée, ce qui permet de simplifier et fiabiliser le fonctionnement du réacteur – dans les centrales classiques, la pression du circuit primaire, indispensable pour que l'eau n'entre pas en ébullition, atteint 155 fois la pression atmosphérique, ce qui engendre des risques de pannes supplémentaires. En cas de coupure d'alimentation, la piscine ◆◆◆

LES CHIFFRES

9 %
La proportion du nucléaire dans la production mondiale d'électricité en 2023, comme en 2022.

320 TWh
délectricité nucléaire produits en France en 2023, dont .

36,6 %
de la production primaire d'énergie en France, 65 % de la production d'électricité.



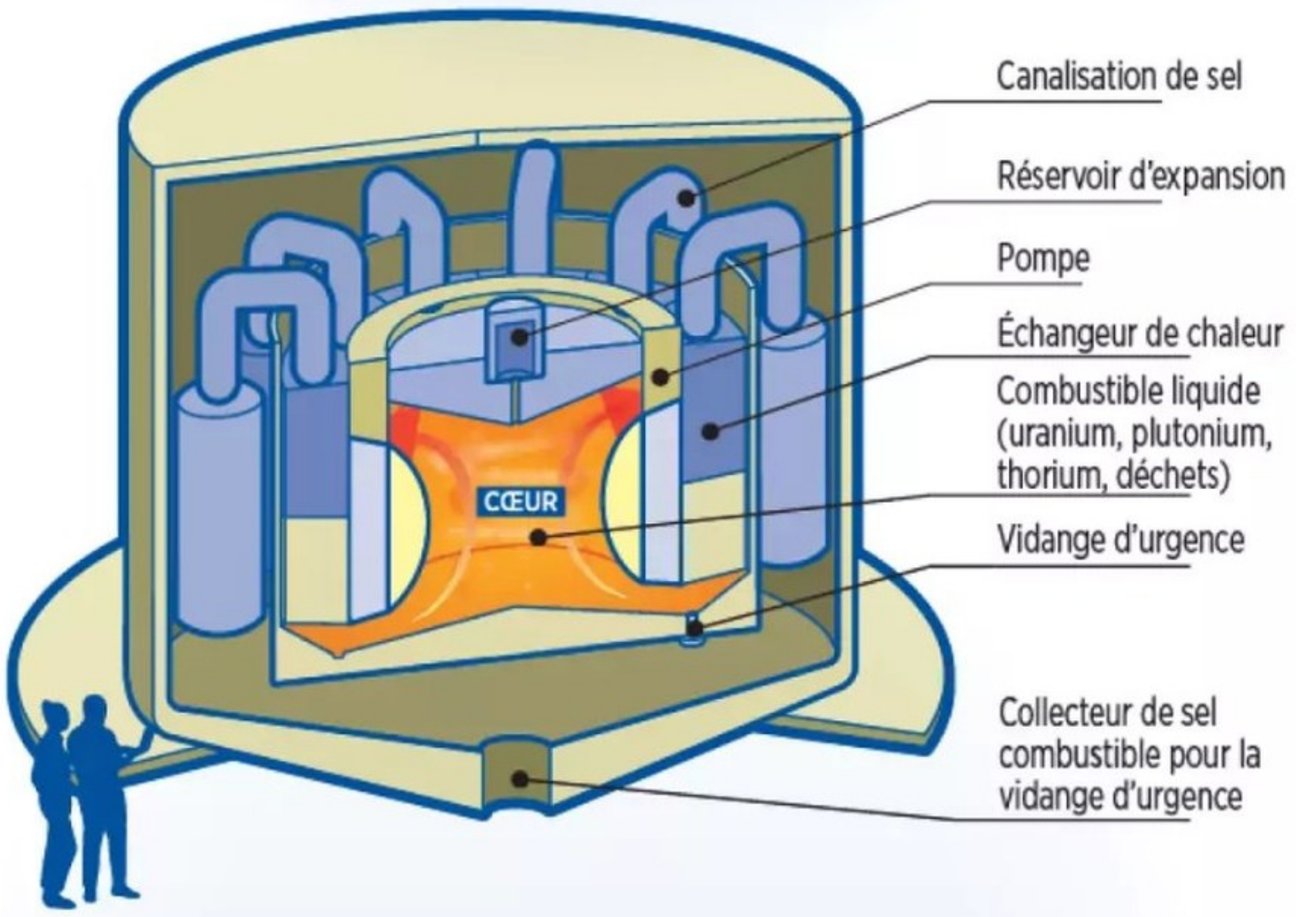
Réacteur à neutrons rapides

Un métal (sodium ou plomb) est utilisé pour transporter – plus efficacement que l'eau – la chaleur créée par fission vers un échangeur, qui réchauffe un gaz utilisé pour produire l'électricité. Le métal sert aussi à refroidir le cœur.

Le plus : la capacité à recycler les déchets, l'utilisation de plusieurs types de combustibles.

Le moins : la quantité importante de plutonium nécessaire pour le faire démarrer.

L'écueil : le passage à l'échelle industrielle. La forte réactivité du sodium.



Réacteur à sels fondus

La matière combustible est dissoute dans des sels fondus, brûlée sous forme liquide. Le liquide fait le tour de la cuve et traverse les échangeurs de chaleur pour produire de l'électricité. La température s'autorégule sans système refroidisseur actif.

Le plus : la capacité à recycler les déchets, la sûreté, l'utilisation de plusieurs types de combustibles.

Le moins : un procédé appelé à faire ses preuves.

L'écueil : le risque de corrosion des tuyaux par les sels.

INFOGRAPHIES: BRUNO BOURGEOIS

◆◆◆ pourra refroidir le réacteur pendant sept jours sans intervention humaine.
De son côté, Jimmy Energy mise sur un AMR basé sur un combustible innovant développé aux États-Unis, le Triso. Il s'agit d'un uranium hautement enrichi – à près de 20 % – pour maximiser l'autonomie de fonctionnement (dix ans sans rechargement). Le combustible est confiné dans de petites billes d'un millimètre enrobées de carbure de silicium qui leur confère une résistance exceptionnelle à la pression et à la température : elles supportent sans dommage trois cents heures d'exposition à 1 800 °C. *« Selon nos simulations, en cas d'accident, une personne située à dix mètres du réacteur serait, au pire, exposée à une dose inférieure à celle reçue lors d'un scanner médical »*, explique Antoine Guyot, cofondateur et PDG de Jimmy Energy. Outre une sûreté améliorée, le Triso permet d'augmenter sensiblement la température de fonctionnement du réacteur – et donc le rendement de conversion de chaleur en électricité. L'entreprise ne traîne pas : elle a grillé la politesse aux autres lauréats de France 2030 en soumettant dès ce printemps deux demandes de construction d'installations nucléaires à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). À noter que le Triso sera également utilisé par Blue Capsule, autre start-up française qui vise la fourniture de chaleur à très haute température (700 °C) pour produire de l'hydrogène sans émission de CO_2 *(lire aussi p. 42-45)* et d'autres produits chimiques.

Le MOX, un assemblage issu du recyclage du combustible nucléaire

Les autres lauréats de France 2030 misent quant à eux sur un mélange de plutonium et d'actinides mineurs (les éléments radioactifs qui ont la durée de vie la plus longue) extraits des combustibles classiques usagés, souvent associé à de l'uranium appauvri – résidu du processus d'enrichissement. C'est ce que l'on appelle le MOX, qui génère des déchets moins encombrants et dangereux que ceux de l'uranium 235. Compte tenu des réserves de déchets qu'elle détient déjà, la France pourrait, avec le MOX, assurer sa production électrique actuelle pendant des milliers d'années, sans extraire le moindre gramme de minerai ! Le MOX suppose un fonctionnement bien diffé-

Un EPR, six petits frères

Ce réacteur pressurisé reprend le concept des réacteurs actuels mais avec une meilleure sûreté. En 2007, lors du démarrage du chantier à Flamanville (Manche), la construction devait durer cinq ans, pour un coût de 3,3 milliards d'euros. Les difficultés techniques, puis le Covid, ont considérablement ralenti le chantier: le réacteur ne sera couplé au réseau électrique que cette année, avec une facture finale estimée à 19 milliards. L'EPR mis en service en Finlande en 2023 a connu des déboires similaires, tout comme les deux EPR de Hinkley Point (Royaume-Uni), dont le démarrage a été reporté à 2029 au plus tôt. La construction des deux EPR de Taishan, en Chine, s'est déroulée en revanche moins difficilement. EDF et ses partenaires ont revu leur copie et conçu l'EPR2, une version moins coûteuse du réacteur. Un plan de construction de six réacteurs a été lancé en 2022, pour un coût évalué à 67 milliards.

rent des réacteurs. Car le noyau d'uranium 238 n'est pas fissile, mais fertile. Ce qui signifie qu'il peut capturer un neutron pourvu que celui-ci possède assez d'énergie pour pénétrer dans le noyau et le transformer en plutonium 239, qui est, lui, fissile. C'est ce que l'on appelle les neutrons rapides, qui se déplacent à environ 20 000 km/s. Plus question d'utiliser un modérateur, et donc de refroidir les cœurs avec de l'eau. Il faut se tourner vers d'autres matériaux, comme le sodium ou le plomb liquide. C'est ce qu'avait fait la France avec Superphenix (1 240 MWe), associant MOX sous forme solide, neutrons rapides et refroidissement au sodium liquide, qui a fonctionné de 1985 à 1996, puis avec Astrid, un projet de réacteur plus petit lancé en 2010 et abandonné en 2019 en raison de son coût.

La combinaison de MOX solide et d'un refroidissement au sodium a toujours ses adeptes. C'est le cas d'Hexana, une start-up née sous l'égide du CEA, ou d'Otrera. Newcleo s'appuiera également sur du MOX solide, avec cette fois un caloporteur en plomb liquide. Une technologie développée en URSS dans les années 1960 pour propulser des sous-marins nucléaires. *« Un réacteur au plomb supporte sans problème une température de 700 °C et, grâce à des phénomènes de contre-réactions, les réactions nucléaires s'arrêtent d'elles-mêmes avant d'atteindre cette température. Il n'y a donc pas fusion du combustible ni ébullition du plomb »*, explique le fondateur de Newcleo, Stefano Buono. Au pire, la majorité des substances radioactives seraient piégées dans le plomb. L'entreprise, qui a déjà levé 400 millions d'euros, veut investir 3 milliards en France pour une usine de MOX et un réacteur de 30 MWe, qui pourra également faire de la cogénération. Newcleo espère une mise en service au début des années 2030.

JIMMY ENERGY

« EN CAS D'ACCIDENT, À DIX MÈTRES DU RÉACTEUR, LA DOSE REÇUE SERAIT INFÉRIEURE À CELLE ÉMISE PAR UN SCANNER MÉDICAL »

Antoine Guyot, PDG de Jimmy Energy

Un accélérateur de particules pour « transmuter » les déchets radioactifs

De son côté, Naarea emprunte une autre voie pour son réacteur de 40 MWe (80 MW thermiques). Le cœur à 700 °C contiendra un mélange de sels fondus à base de sodium, de plutonium et d'actinides mineurs, et d'un peu d'uranium appauvri. Cette technologie, testée aux États-Unis dans les années 1950, sera aussi utilisée par Stellaria, autre émanation du CEA. *« Nous utilisons des neutrons rapides »*, explique Jean-Luc Alexandre, cofondateur et patron de Naarea. Le rendement de conversion électrique atteindra 50 %. Naarea a multiplié les partenariats, notamment avec le Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie de Grenoble, et cofondé un laboratoire dédié aux sels fondus avec le CNRS, à Orsay. *« Nous visons une mise en service en 2029 et une introduction sur le marché un an plus tard »*, explique Jean-Luc Alexandre. Quant au franco-néerlandais Thorizon, il planche sur une combinaison de combustible liquide associant du thorium aux matières issues du retraitement des déchets nucléaires.

Une start-up suisse, Transmutex, explore quant à elle une voie inédite. Elle tente en effet de concrétiser le rêve de Carlo Rubbia, prix Nobel de physique: utiliser un accélérateur de particules pour « transmuter » les déchets et s'en débarrasser. Un accélérateur de particules crée un faisceau de protons à très haute énergie qui sont transformés en neutrons dans le cœur du réacteur, où ils bombardent le combustible, mélange de déchets nucléaires et de thorium. L'ensemble est refroidi au plomb. *« Il suffit de couper l'alimentation pour que la réaction s'arrête instantanément »*, explique Franklin Servan-Schreiber, patron de Transmutex. Une première installation est prévue pour 2035.

Toutes ces start-up s'imaginent chambouler l'industrie nucléaire. Reste à savoir si elles auront les reins assez solides pour mener leurs projets à terme.

DENIS DELBECQ

Le solaire en quête de nouveaux espaces

Dans les villes, dans les champs et même sur l'eau ! Le photovoltaïque déploie désormais ses panneaux tous azimuts. Objectif : atteindre les 3000 hectares que le secteur prévoit d'équiper chaque année.

C'est en 2023 que le solaire a véritablement démarré en France. Boosté par l'explosion du prix de l'énergie, le secteur est passé de moins de 1 gigawatt (GW) installé pour toute l'année 2021 à 3,1 GW en 2023. La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) prévoit un total cumulé de 35 à 40 GW en 2028, contre 15 en 2022. Pour atteindre cet objectif ambitieux, il faudra de la place : 1 mégawatt (MW) de puissance nécessite en effet un hectare. Selon le Syndicat des énergies renouvelables (SER), plus de 3000 hectares devront ainsi être alloués chaque année au photovoltaïque. Une surface *a priori* disponible sans empiéter sur d'autres usages.

Car le solaire conquiert des espaces parfois inattendus et intéresse de plus en plus de producteurs d'électricité – entreprises, ou particuliers en autoconsommation. En 2023, le gestionnaire du réseau de distribution Enedis a ainsi raccordé 200000 d'entre eux. Plus de 500000 toits de maisons sont à l'heure actuelle équipés de panneaux photovoltaïques, dont la production est soit vendue à EDF, soit utilisée sur place. Et les initiatives d'autoconsommation collective se comptent désormais par centaines. Selon les habitudes de consommation et l'efficacité des appareils ménagers, la facture d'électricité peut diminuer de 15 à 40 %. Le raccordement au réseau n'est par ailleurs pas obligatoire. On trouve facilement sur le marché des panneaux solaires que l'on peut brancher directement sur son installation électrique.

Sur le toit des bâtiments neufs ou rénovés

Le panneau en toiture est un grand classique du photovoltaïque. Selon les calculs de l'Ademe, l'agence de la transition écologique, l'ensemble des toits de France pourrait accueillir une puissance de production de 364 GW. La loi relative à l'accélération des énergies renouvelables – dite loi Aper – impose le solaire sur 30 % des toitures des bâtiments neufs en 2023, 40 % en 2026, 50 % en 2027. Les immeubles entreprenant des rénovations lourdes sont aussi concernés. Les promoteurs gardent cependant le choix entre l'installation de panneaux ou la végétalisation de la toiture pour rafraîchir le bâtiment et diminuer ses besoins en climatisation. Cependant, la liste des exceptions est longue. Les bâtiments ne pouvant supporter le poids des panneaux sont exemptés, ainsi que ceux qui ne peuvent être équipés à des conditions économiques acceptables, ce qui ouvre la voie à des contestations techniques et juridiques nombreuses.

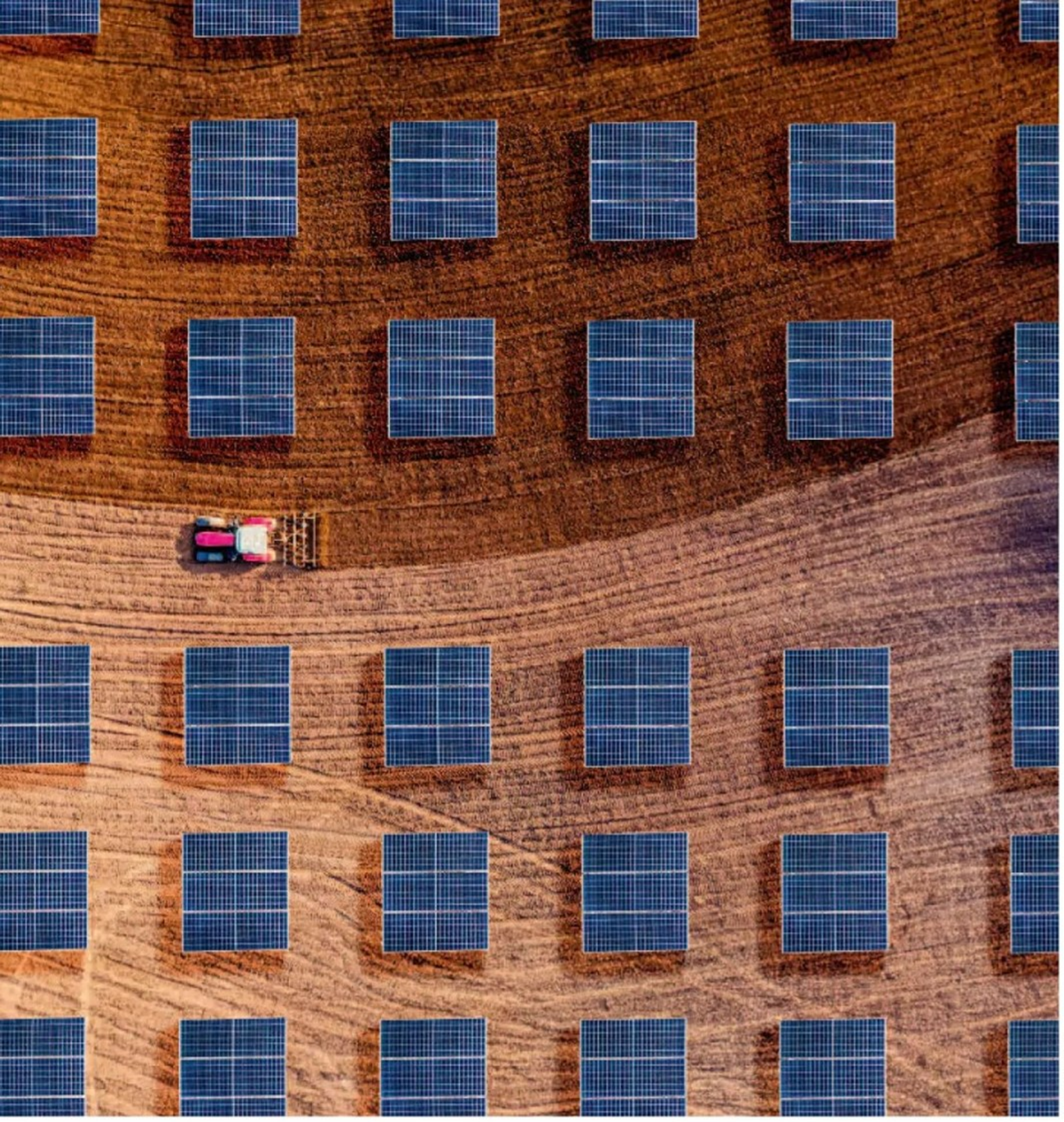
Sur les friches industrielles et les parkings

En 2019, l'Ademe a estimé que 17764 sites de métropole pouvaient accueillir une centrale photovoltaïque. Le gisement est estimé à 53 GW, à 93 % sur les sites délaissés et 7 % sur les parkings. Ces friches sont pour un quart des dépôts d'hydrocarbures désaffectés, loin devant les anciens sites de commerce, d'artisanat et d'industrie mécanique, et de stockage de déchets. Pour des raisons réglementaires, tous ne sont pas exploitables. Ainsi, une modification de la loi Littoral n'autorise pas la construction de parcs solaires sur les sites pollués. Des projets surprenants émergent : le groupe agroalimentaire Roullier a ainsi couvert les 4 hectares

J. CHISCANO-SER

« TOUS LES PARKINGS DE 80 PLACES ET PLUS VONT DEVOIR ÊTRE ÉQUIPÉS D'OMBRIÈRES PHOTOVOLTAÏQUES : CEUX DES SUPERMARCHÉS, DES HÔPITAUX… »

Alexandre Roesch, délégué général du Syndicat des énergies renouvelables



GETTY IMAGES

Après l'Espagne, pionnière dans le domaine (ici en Catalogne), la France se lance à son tour dans l'agrivoltaïsme.

d'un ancien circuit de motocross, en Ille-et-Vilaine, de 9500 panneaux, pour une puissance de 4 MW.

La loi Aper oblige à équiper d'ombrières photovoltaïques toutes les surfaces artificialisées des parkings de plus de 1500 mètres carrés. *« À 11,5 mètres carrés par emplacement de voiture, cela signifie que tous les parkings de 80 places et plus sont éligibles!* se réjouit Alexandre Roesch, délégué général du SER. *Ceux des supermarchés, des hôpitaux, de bon nombre d'entreprises… »* Ainsi, le groupe Carrefour vient de s'associer au développeur d'énergie GreenYellow pour équiper d'ici 2027 ses 350 parkings de France, pour une capacité de 350 MW. Mais la règle est, là encore, copieusement truffée d'exceptions portant notamment sur des règles municipales ou d'urbanisme commercial.

Au bord des autoroutes et des voies de chemin de fer

Il est désormais possible d'implanter des panneaux solaires sur les « délaissés » des autoroutes, des routes nationales et des lignes de chemin de fer, c'est-à-dire les terrains nus non utilisés situés aux abords de ces voies. Auparavant, pour des raisons de pollution atmosphérique et sonore, toute construction était interdite sur une distance de 100 mètres. Désormais, les panneaux pourront même être installés à deux mètres seulement des rails de chemin de fer. Selon une étude commandée par la société d'autoroute Vinci en 2021, le gisement estimé est de 18 à 24 GW si l'on équipe les 12 000 kilomètres d'autoroutes. Ce sera loin d'être le cas, pour des raisons techniques (ensoleillement insuffisant, orientation des pentes, etc.) et de protection de la biodiversité. Ainsi, la Ligue de protection des oiseaux (LPO) a signé avec les gestionnaires d'autoroutes des accords de protection des espèces fréquentant les talus vierges de pesticides, coincés entre les champs et la route. Autre crainte parfois exprimée : que les panneaux n'éblouissent les conducteurs. Il existe cependant des verres non réfléchissants qui résolvent le problème.

Dans les exploitations agricoles

La loi définit l'agrivoltaïsme comme l'installation, sur des parcelles agricoles, de panneaux photovoltaïques dont la production permet de maintenir les cultures, voire favorise leur croissance. Ces panneaux ne doivent pas couvrir plus de 40 % de la surface d'un champ, et toute installation doit être démontable facilement. Les rendements énergétiques sont moindres car les panneaux sont escamotés quand les plantes ont besoin de lumière. À l'inverse, ils protègent celles-ci des températures excessives et des précipitations. Des centaines d'installations sont en cours de développement, dont celles de regroupements d'exploitants comme Terr'Arbouts, dans les Landes, le plus important de France : 732 000 panneaux pour une production estimée à 650 gigawattheures par an. Les surfaces concernées par l'agrivoltaïsme au niveau national représentent 60 000 hectares, sur 29 millions d'hectares de surface agricole utile.

Au-dessus des flots

L'avantage des centrales solaires en mer, c'est que la place ne manque pas… Le photovoltaïque marin ne connaît en France qu'une réalisation – un démonstrateur situé à Sète, dans l'Hérault. Les panneaux sont posés à sept mètres au-dessus de la surface sur des flotteurs assemblés par des liaisons souples qui amortissent la houle, le tout étant ancré au fond de l'eau. Les concepteurs estiment que le parc d'un hectare qui remplacera ce démonstrateur, et dont la mise en service est prévue pour 2025, pourra affronter des vagues de 10 mètres. Situé à deux kilomètres du littoral, il alimentera le port de commerce de Sète.

LOÏC CHAUVEAU

L'OCÉAN, ELDORADO DES RENOUVELABLES

Les éoliennes se multiplient au large des côtes. Un prologue à l'exploitation des ressources infinies du vent, des vagues ou des courants, qui pourrait fournir près du quart de l'électricité française en 2050. Hydroliennes, serpents de mer, lagons marémoteurs... Petit tour d'horizon de technologies en plein essor.

◆◆◆ *le manque de disponibilité des navires qui, en mer, installent les turbines sur leurs fondations*, continue le spécialiste. *Pour les éoliennes flottantes, ce sera le faible nombre de grues susceptibles de les assembler au port avant qu'elles ne soient tractées sur leur lieu d'amarrage.* » Des grues gigantesques, dont les coûts de déplacement sont prohibitifs.

Au large de Belle-Île-en-Mer, le premier parc éolien flottant français

Car c'est la solution à déployer lorsque la profondeur est trop importante pour que les turbines soient posées, c'est-à-dire au-delà de 50 mètres : des éoliennes qui flottent. Alors que l'éolien posé est condamné à rester proche des côtes, l'éolien flottant, lui, peut conquérir le large, là où les vents, plus forts et plus réguliers, garantissent une meilleure efficacité et une plus grande fiabilité. En témoigne son facteur de charge, c'est-à-dire le rapport entre énergie réellement produite et énergie maximale théorique. D'après les mesures réalisées sur les premières installations, il serait d'environ 65 %, contre 40 % en moyenne pour les fermes posées… et 22 % pour un parc terrestre.

Mais le développement commercial de l'éolien flottant en est à ses balbutiements. À l'échelle européenne, on recense trois fermes en cours d'exploitation au large de l'Écosse et de la Norvège – cette dernière, illustration même des paradoxes de la situation énergétique actuelle, alimente… des plates-formes pétrolières et gazières – , qui totalisent 170 MW, et plusieurs fermes pilotes visant à tester des technologies différentes. Soit un total de 200 MW. Jusque-là observatrice, la France pourrait devenir l'un des acteurs clés du secteur. En effet, au contraire de la mer du Nord et de son large plateau continental peu profond, les eaux de l'Hexagone plongent rapidement au large des côtes, dont les sites propices au posé arriveront vite à saturation. Le coup d'envoi français de l'éolien flottant a été donné en mai dernier, lorsque le gouvernement a sélectionné le consortium formé par l'énergéticien belge Elicio et l'allemand BayWa r.e. pour installer un parc commercial au large de Belle-Île-en-Mer. Avec une puissance de 250 MW, il s'annonce comme le plus puissant au monde lors de sa mise en service prévue pour 2031.

Composants critiques du flottant, les lignes d'ancrage de ces premières éoliennes seront suivies avec attention. Des câbles qui doivent, entre autres, résister aux tempêtes. « *Une turbine posée sur une fondation flottante subit des forces liées aux vagues, à la marée et au vent*, explique Ken Ilacqua. *L'éolien flottant reprend certes des briques technologiques du posé, mais celles-ci doivent encore être adaptées pour que la technologie soit performante et durable.* » Au-delà de la question des ancrages, du côté des innovations,

AZUKI WAKASUGI/AP/SIPA

En 2013, deux ans après la catastrophe nucléaire de Fukushima, le Japon a inauguré un parc éolien flottant baptisé « Fukushima Forward ». Ici, une des éoliennes est remorquée après une panne, en 2020.

KEN ILACQUA

« UNE TURBINE POSÉE SUR UNE FONDATION FLOTTANTE SUBIT DES FORCES PUISSANTES LIÉES AUX VAGUES, À LA MARÉE ET AU VENT »

Ken Ilacqua, responsable des projets en mer chez Océole

STEPHANE MAHE/REUTERS

Deux pièces de transition, de couleur jaune vif, attendent d'être coiffées par un mât dans le premier parc français d'éolien posé, mis en service au large de Saint-Nazaire (Loire-Atlantique) en 2022.

Onze millions de kilomètres carrés. C'est la taille du domaine maritime français, un terrain de jeu formidable pour déployer les énergies en mer. Avec pourtant du retard: celles-ci ne sont entrées qu'en 2022 dans le panorama national de l'électricité renouvelable. C'est à cette date, en effet, que le premier parc éolien *offshore* a été mis en service à une quinzaine de kilomètres au large de Saint-Nazaire. Ses 80 éoliennes de 6 MW fournissent aujourd'hui 20 % des besoins en électricité de la Loire-Atlantique.

Petite précision sémantique. *Stricto sensu*, les énergies marines renouvelables (EMR) désignent l'ensemble des solutions permettant de produire de l'électricité à partir de la mer – vagues, courants, marées – via la différence de température entre les eaux de surface et les eaux profondes, ou bien le gradient de salinité. Par abus de langage, on y associe la filière des éoliennes en mer, qui peuvent être posées lorsque le fond marin s'y prête, ou flottantes, arrimées néanmoins au plancher océanique par des lignes d'ancrage. Ces deux types de filière énergétique – marine et éolienne – diffèrent par la source naturelle qu'elles exploitent, mais aussi par la maturité des technologies sous-jacentes. Alors que la première n'en est qu'à ses débuts, certes encourageants avec la mise à l'eau de démonstrateurs et le projet d'installations pilotes, la seconde bénéficie d'un retour sur expérience d'une quinzaine d'années.

Affichant des coûts de production faibles, l'éolien en mer posé est désormais compétitif par rapport aux autres énergies électriques. En 2024, cette filière industrielle présente une capacité de 1,5 gigawatt (GW) répartie équitablement entre trois parcs: Fécamp, Saint-Brieuc et, donc, Saint-Nazaire *(voir la carte p. 57)*. Et les choses devraient s'accélérer car, en 2023, l'État a redéfini la cadence à suivre pour l'éolien *offshore*: une attribution d'appels d'offres de 2 GW par an au minimum, pour atteindre 18 GW de puissance raccordée au réseau à l'horizon 2035 et 45 GW en 2050. Soit possiblement 25 % de la production électrique française.

Cependant, s'il a le vent en poupe, *« l'éolien en mer posé nécessite toujours des travaux de recherche et développement,* énonce Jean-François Filipot, directeur scientifique de l'institut France Énergies Marines (FEM). *Pour mieux l'intégrer à l'environnement* (lire aussi l'encadré p. 57) *et augmenter sa rentabilité. »* Au cours de la prochaine décennie, les parcs devraient atteindre des capacités unitaires de 3 GW. Leur superficie, actuellement d'une centaine de kilomètres carrés, s'en trouvera augmentée. Pour éviter encore la surenchère et les exploiter à moindre coût, les constructeurs de turbines se sont engagés dans une course à la puissance… et au gigantisme. Le record est détenu par le modèle de 14 MW, Haliade-X, de l'entreprise franco-américaine GE Renewable Energy, dont les pales de 107 mètres de long tournent depuis 2021 au large des côtes anglaises. Et d'autres géantes sont annoncées: celles du futur parc Centre Manche 1, par exemple, devraient accuser une capacité de 23 MW chacune. *« Se profilent d'importants problèmes de sillage entre les machines,* précise Jean-François Filipot. *Car à l'aval d'une turbine, on observe une baisse de la vitesse du vent, synonyme de perte de productivité pour l'éolienne suivante. Mais aussi des turbulences additionnelles, qui ont un impact sur l'usure des machines en les forçant à travailler davantage. »* Une contrainte à anticiper pour les opérateurs, qui doivent ajuster individuellement l'orientation des turbines.

Consensus chez les turbiniers pour ralentir la course au gigantisme

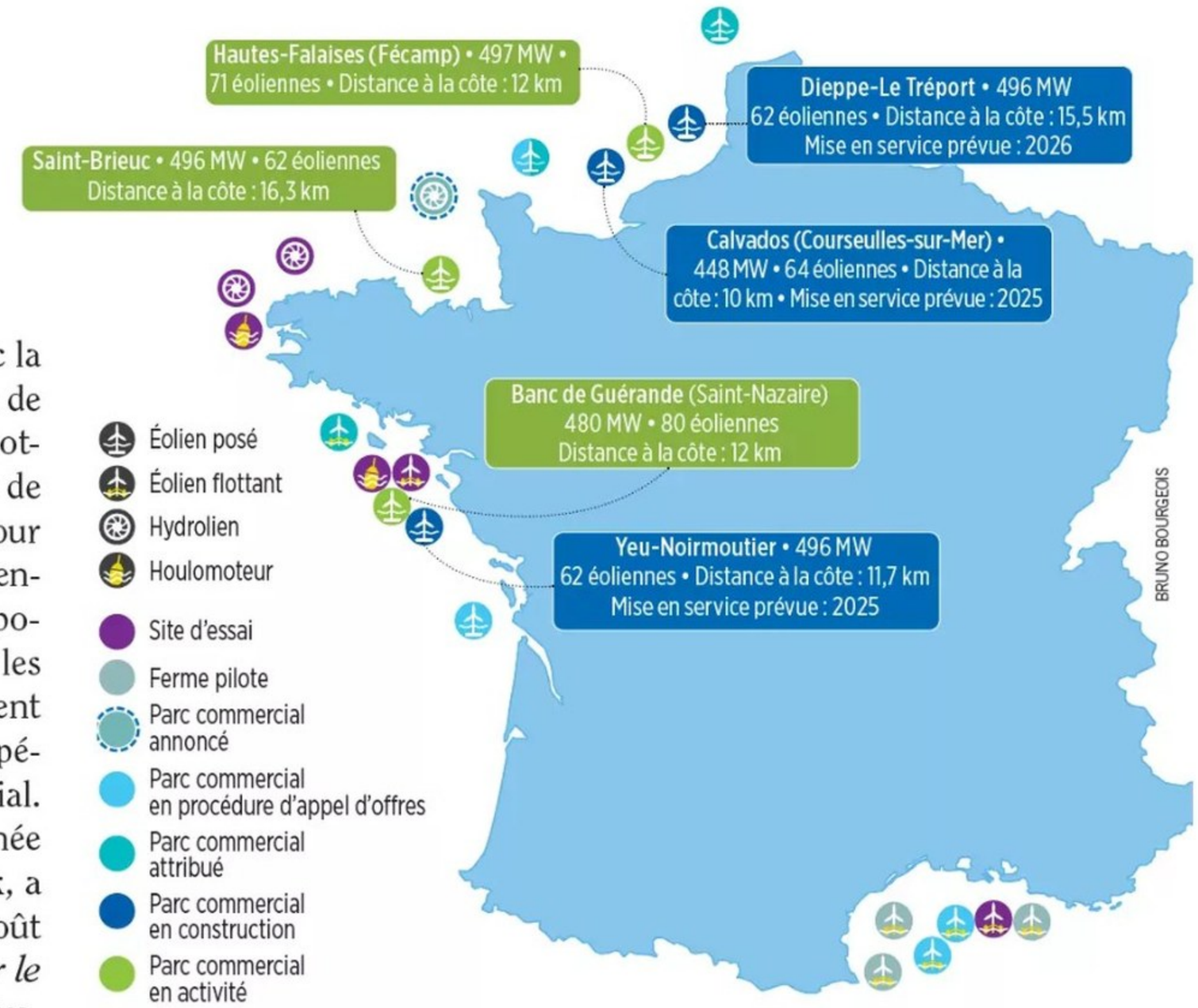
Ce gigantisme pose question. Et si certains acteurs, telle l'Université technique du Danemark, l'un des leaders européens de la recherche sur l'éolien, prospectent des sites pouvant accueillir des turbines de 40 MW, les industriels se montrent prudents. *« Il y a un consensus parmi les turbiniers européens pour ralentir cette quête de la démesure »,* constate Ken Ilacqua, responsable des projets en mer chez Océole, alliance d'entreprises qui se consacre au développement *offshore*. Car le secteur n'est pas encore prêt. Les usines doivent s'agrandir, les infrastructures portuaires sortir de terre. *« Le goulet d'étranglement de l'éolien posé, c'est* ◆◆◆

un pas important devra être franchi avec la mise au point d'une nouvelle génération de sous-stations de collecte d'électricité, flottantes elles aussi. Elles seront équipées de câbles haute tension en courant continu pour éviter les pertes en ligne du fait de l'augmentation des distances : de nouveaux composants électrotechniques aptes à encaisser les contraintes spécifiques du flottant doivent être validés en mer. Enfin, minimiser les opérations de maintenance est un enjeu crucial. Une étude théorique publiée en 2020, menée par l'université d'Aarhus, au Danemark, a estimé que ce poste absorbait 20 % du coût de fonctionnement. « *Pour programmer le remplacement des pièces, les parcs industriels seront dotés de capteurs permettant de surveiller leur usure, de simuler les mouvements des machines et d'estimer les détériorations à venir* », commente Jean-François Filipot. Avec une contrainte absolue : toutes les interventions devront se faire en mer.

Au fond de l'eau, les hydroliennes exploitent la vitesse des courants

En prenant le large, l'éolien flottant atténue deux points de blocage courants de l'éolien traditionnel, à savoir l'impact visuel et les conflits d'usage. Ce même atout est revendiqué par l'hydrolien, une énergie marine qui, grâce à des turbines ancrées sur le fond marin, exploite la vitesse des courants pour produire de l'électricité. Alors que la phase des démonstrateurs s'achève, de premières autorisations d'exploitation ont été données fin 2023 aux sociétés HydroQuest et Normandie Hydroliennes pour installer leurs fermes pilotes de 17 MW et de 12 MW respectivement, dans le raz Blanchard (Manche). Avec des vitesses atteignant 12 nœuds (environ 22 km/h), les courants de marée de cette zone située entre le cap de la Hague et l'île anglo-normande d'Aurigny sont parmi les plus forts au monde.

En tournant à grande vitesse dans l'eau, les pales des hydroliennes convertissent l'énergie cinétique du courant de façon efficace ◆◆◆



Du vent dans les pales

La France compte, en 2024, trois parcs éoliens posés en activité – soient 213 turbines – et trois en construction. Tous les autres projets EMR (énergies marines renouvelables) en sont aux phases préliminaires : ferme-pilote, site d'essai ou appel d'offres.

Quand les turbines perturbent la faune marine

La présence des parcs *offshore* n'est pas anodine pour le milieu marin. Les impacts les plus sérieux sont la pollution acoustique sous-marine et le risque de collision d'oiseaux avec les pales des turbines. Ou, au contraire, l'évitement de ces zones par certaines espèces. Mais des parades existent. L'emploi de rideaux de bulles est par exemple un moyen d'atténuer les émissions sonores dans l'eau. Aux Pays-Bas, la surveillance météo permet d'anticiper la migration de milliers de grives depuis et vers le Danemark. La rotation des pales est stoppée quelques heures, quand les oiseaux traversent les parcs.

Sous la surface, une profonde modification du paysage se dessine, car les structures sont colonisées par de nombreuses espèces. C'est « l'effet récif ». Le suivi scientifique de plusieurs parcs belges montre qu'au bout de dix ans, trois d'entre elles dominent : l'anémone plumeuse, la moule commune et le crustacé *Jassa herdmani*. « *Ces organismes filtreurs se nourrissent du plancton en suspension,* explique Steven Degraer, chercheur à l'Institut royal des sciences naturelles de Belgique et responsable du suivi. *Leurs larges populations concourent à redistribuer la matière organique qui transite dans l'écosystème marin.* » Et cette matière organique enrichit les fonds sableux, habituellement pauvres autour des éoliennes. Avec quel impact écologique ? « *C'est dans le sud de la mer du Nord que la question doit être documentée* », complète l'écologue. Car quatre pays projettent d'y développer des éoliennes dans les années à venir.

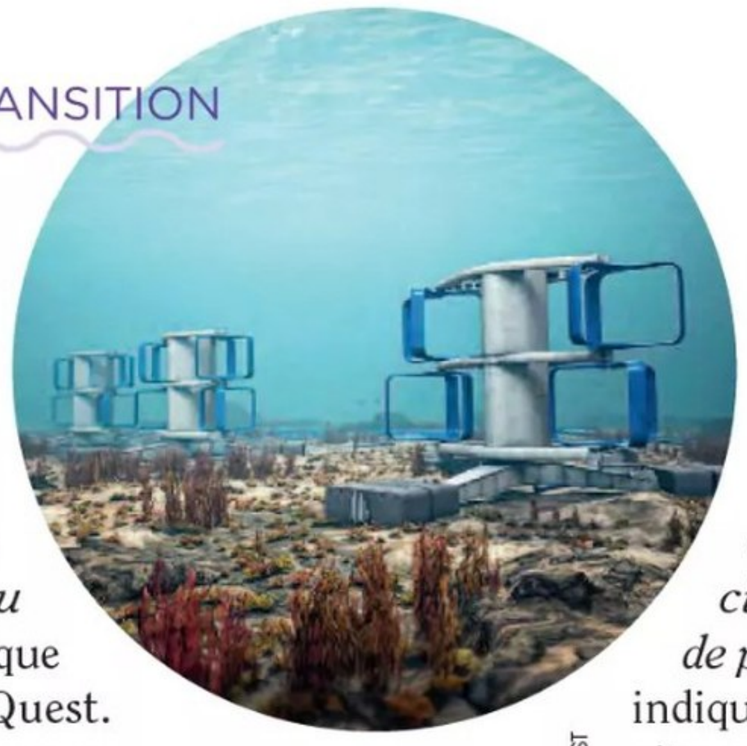
L'étourneau sansonnet occupe la huitième place des oiseaux victimes des éoliennes en France.

ALAMY/PHOTO12

◆◆◆ par rapport au volume qu'elles occupent. « *Cette forte densité énergétique nous permet de construire des machines assez compactes au regard de la puissance délivrée*, explique Thomas Jaquier, président d'HydroQuest. *Un atout pour la filière, qui pourra compter sur des usines déjà existantes pour se déployer.* » Avec une mise en route prévue en 2028, les sept hydroliennes d'une puissance de 2,5 MW de la future ferme FloWatt mesureront 10 mètres de haut pour 25 mètres de large. Elles seront immergées à 35 mètres de profondeur et devraient fournir 41 GWh par an pendant vingt ans.

Car, autre avantage de cette technologie, la production électrique de l'hydrolien est prédictible. « *Cela s'explique par la régularité des marées, qui nous permet de calculer les flux et reflux du courant marin* », ajoute Thomas Jaquier. Des prévisions qui intéressent les responsables du réseau. À condition que la technologie tienne ses promesses. Pendant cette phase pilote, il s'agira de vérifier que les hydroliennes atteignent les performances attendues, et ce, de façon durable, dans les conditions inédites du raz Blanchard. Une zone dont l'accès particulièrement difficile contraindra les opérateurs à intervenir pendant la période de l'étale (trois heures environ).

« *En testant des hydroliennes sur nos sites, on a pu observer comment de grosses pierres "volent" littéralement dans ces forts courants et viennent heurter les turbines* », illustre Bertrand Alessandrini, directeur de la fondation Open-C, qui coordonne à l'échelle nationale les essais en mer de prototypes utilisant les énergies marines. La résistance des installations est un point délicat de cette technologie et peut en alourdir notablement les coûts d'exploitation. Un premier projet commercial de 250 MW dans le raz Blanchard pourrait être annoncé en 2026. D'autres suivront, sur le même site, avec un total de 2,5 GW attribués d'ici à 2035.



HYDROQUEST

Située en Normandie, dans le raz Blanchard, l'un des courants de marée les plus puissants de la planète, la ferme hydrolienne FloWatt devrait être opérationnelle en 2028 (vue d'artiste).

« La mer en débat », compte rendu et bilan de la Commission nationale du débat public, https://sciav.fr/debat

***The Conversation*,** « Où installer les 50 parcs éoliens en mer prévus d'ici 2050? », https://sciav.fr/install

La machine houlomotrice, un « serpent de mer » électrique

Autre énergie marine et autre ressource : l'énergie houlomotrice, qui tire profit du mouvement des vagues. Évalué par l'Ifremer dès les années 1980, son potentiel serait, sur la façade atlantique française, de l'ordre de 10 à 15 GW. « *En cinquante ans, plusieurs centaines de prototypes ont sans doute été testés,* indique Jean-François Filipot. *Sans qu'il y ait eu convergence vers un concept unique.* » Un frein, donc, au développement des technologies envisagées. Celles-ci captent l'énergie des vagues selon quatre procédés différents : en utilisant leurs ondulations, en profitant du déplacement des masses d'eau sous la surface, en jouant des variations de hauteur d'eau et de pression créées à leur passage, enfin, en retenant l'eau des crêtes de vagues. Basé sur le premier principe, le système houlomoteur le plus connu est celui de la chaîne flottante articulée, encore appelée « serpent de mer ». Cet automne verra la fin de la période d'essais d'un prototype de cette catégorie, conçu par la start-up Seaturns sur le site Ifremer de Sainte-Anne du Portzic, près de Brest. Réduit pour l'instant à un seul flotteur, le dispositif est un cylindre de 3,50 mètres de long bercé par la houle. Son oscillation génère à l'intérieur du caisson un flux d'air qui entraîne une turbine produisant de l'électricité.

« *Après des essais préliminaires réalisés dans l'un des bassins océaniques de l'École centrale de Nantes, pour valider le concept, l'objectif est d'évaluer le rendement énergétique du système,* explique Bertrand Alessandrini. *Même si nous n'en aurons une idée précise qu'avec la version finale.* » Il s'agit aussi de vérifier la résistance du caisson à la corrosion et de savoir si les algues qui s'agrippent

Des éoliennes… pour faire de l'hydrogène ?

Déployer des éoliennes flottantes à plus de 50 kilomètres des côtes afin qu'elles soient invisibles et performantes tout en ne gênant pas le trafic maritime : la solution est séduisante. Mais des problèmes subsistent. Entre autres, il faut concevoir des sous-stations électriques flottantes et les câbles raccordant ces dernières au réseau électrique terrestre. Et plus le parc flottant sera loin des côtes, plus les coûts de rapatriement de l'électricité seront importants.
Et si, au lieu d'exporter cette énergie, on la stockait en mer sous forme de gaz hydrogène, que l'on pourrait rapatrier par bateaux ou tuyaux ? La solution est techniquement faisable, ainsi que l'atteste un essai pionnier, réalisé par électrolyse de l'eau, mené par la société Lhyfe, spécialisée dans la production d'hydrogène à partir d'énergie renouvelable. En mai 2023, installé sur une plateforme flottante, l'électrolyseur de 1 MW de l'installation Sealhyfe a été raccordé à l'éolienne flottante du site d'essais SEM-REV de l'École centrale de Nantes (opéré par la fondation Open-C). Ancrée à une barge flottante, cette turbine fournit 2 MW d'électricité. Pendant sept mois, le pilote Sealhyfe a produit de l'hydrogène, jusqu'à 400 kg par jour, tout en étant confronté à différentes conditions météo et soumis à des tests visant à étudier les mouvements de la plateforme et les agressions environnementales (sel, corrosion…). Les données, en cours d'analyse, devraient être exploitées dans le cadre du projet Hope : une unité de production d'hydrogène *offshore* de 10 MW prévue pour 2026 au large d'Ostende (Belgique).

au système en diminuent les performances. Le modèle définitif comprendra 10 cylindres arrimés en pleine mer qui, côte à côte, pourraient produire l'équivalent de ce que génère une éolienne moyenne. Une solution à envisager pour alimenter des îles. Ou encore pour faire tourner des usines de dessalement installées sur les côtes.

En octobre 2023, la start-up Seaturns a installé près de Brest le prototype à l'échelle 1/4 d'un dispositif houlomoteur.

IFREMER, OLIVIER DUGORNAY

Entre eau de mer et eau douce, une différence de salinité source d'énergie

Modifier la concentration en sel, tel est aussi le principe de l'énergie osmotique, qui tire profit de la différence de salinité entre eau de mer et eau douce, et connaît un développement encourageant avec le démarrage d'un démonstrateur inédit en France (*lire aussi l'interview p. 65*). Avant la fin de l'année, les membranes biosourcées de l'entreprise Sweetch Energy devraient entrer en action dans la centrale osmotique construite à l'embouchure du Rhône. Leur rôle ? Permettre le passage, ou non, d'ions chlorure et sodium transitant à travers de minuscules pores depuis des compartiments alimentés en eau salée (issue de la Méditerranée) vers des réservoirs contenant de l'eau douce (provenant du fleuve). Ce courant ionique est transformé en courant électrique grâce à un cycle de réactions d'oxydoréduction mises en jeu à la surface d'électrodes complétant le dispositif. Les centaines de membranes devraient permettre d'obtenir une vingtaine de kilowatts.

Le dernier potentiel à explorer, c'est celui de l'énergie thermique des mers (ETM). L'idée est d'exploiter la différence de température entre les eaux de surface chauffées par le soleil et les eaux froides pompées à grande profondeur (1 000 mètres) pour produire de l'énergie. L'eau chaude est utilisée par une machine thermique pour évaporer un fluide à faible point d'ébullition, créant ainsi de la vapeur qui entraîne une turbine générant de l'électricité. L'eau froide sert à condenser le gaz, qui retourne à l'état liquide… et le cycle peut recommencer. Près d'Hawaï, la centrale conçue par la société américaine Makai produit 105 kW de courant électrique depuis 2015, c'est-à-dire de quoi satisfaire 120 foyers. Le concept fonctionne, mais de nombreux verrous technologiques subsistent. Nemo, le projet français implanté en Martinique, initié en 2014, a d'ailleurs été abandonné cinq ans plus tard. Le potentiel dans les eaux tropicales est pourtant énorme.

Parce que la France est pionnière en la matière, finissons ce tour d'horizon des énergies en mer par l'énergie marémotrice et le barrage de la Rance. Située en Bretagne, entre Dinard et Saint-Malo, et mise en service en 1966, l'usine est restée jusqu'en 2011 la plus puissante au monde avec ses 240 MW installés. Pour être détrônée par la centrale de Sihwa (Corée du Sud) et ses 254 MW. Pour des raisons environnementales, la construction de grands barrages tirant parti des marées n'est plus d'actualité. Une alternative plus acceptable, les lagons marémoteurs, pourrait cependant voir le jour. Équipés de turbines, ces bassins d'eau artificiels, créés en mer grâce à la construction d'une digue reliée à la côte à ses deux extrémités, se situent en effet en marge des estuaires : ils entravent moins le fonctionnement des écosystèmes naturels. Les énergies marines n'ont pas fini de se réinventer.

CAROLINE DEPECKER

Le cargo Canopée convoie en Guyane des éléments de la fusée Ariane 6. Grâce à ses quatre ailes, il économise 15 % de carburant.

ARIANE GROUP VIA ABACAPRESS.COM

Le transport à voile a le vent en poupe

Des compagnies maritimes misent aujourd'hui sur la propulsion vélique pour transporter des marchandises autour du monde. Un pari qui permet, déjà, des économies d'énergie substantielles.

« *Ce n'est pas un retour à la voile, mais une réinvention* », s'exclame Lise Detrimont, déléguée générale de Wind Ship. L'association, créée en 2019, s'est fixé pour objectif de promouvoir la propulsion vélique dans la marine marchande en s'appuyant sur des systèmes innovants tels que les rotors, les profils aspirés, les ailes rigides ou les ailes de kite. « *Certaines études montrent que la moitié de la flotte mondiale pourrait être équipée d'ici à 2050, car de nombreuses routes maritimes sont suffisamment ventées* », se réjouit-elle. De plus, certaines technologies peuvent être installées sur des navires déjà existants, en complément d'une motorisation.

Lise Detrimont observe d'ores et déjà « *une belle dynamique* ». En seulement quelques années, une quarantaine de navires ont été équipés dans le monde, et leur nombre double d'une année sur l'autre. Rien qu'en France, où il en existe déjà plus de dix, une quinzaine d'autres devraient être mis à l'eau d'ici deux ans.

Aujourd'hui, le transport maritime, avec ses 100 000 navires de fret qui transportent 90 % des marchandises de la planète, représente 3 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre – un chiffre qui pourrait atteindre 17 % en 2050, selon l'Organisation maritime internationale (OMI). Car l'OCDE estime que le trafic maritime pourrait tripler d'ici là. En 2023, les 175 États membres de l'OMI se sont fixé l'objectif de parvenir à la neutralité carbone d'ici à 2050. « *Un énorme défi*, concède le porte-parole de l'organisation. *Il est donc nécessaire de se tourner vers des carburants alternatifs et des solutions de propulsion telles que l'ammoniac, les biocarburants, l'énergie électrique, les piles à combustible, l'hydrogène, le méthanol et, bien sûr, l'énergie éolienne.* »

Or, bien des questions se posent à propos des carburants alternatifs – qui, aujourd'hui, ne sont même pas présents sur le marché : la disponibilité, le prix, la sécurité, ou encore la surface nécessaire à la culture des biocarburants. Alors que le vent est gratuit, inépuisable, et sans risque pour l'environnement.

Avant de fonder Zéphyr & Borée, compagnie spécialisée dans le transport à voile dont il est aujourd'hui président, Nils Joyeux s'est longtemps interrogé sur les moyens de décarboner la marine marchande. « *Nous sommes encore trop techno-solutionnistes. La stratégie de décarbonation du secteur maritime repose sur les carburants alternatifs et les énergies*

renouvelables. Mais les secteurs automobile, aérien et tertiaire ont la même approche! La demande va donc exploser, et les besoins ne pourront être satisfaits. Or, les navires, contrairement aux camions ou aux avions, peuvent utiliser des voiles et s'extraire de la dépendance aux carburants. Il faut en profiter. »

Des ailes rigides pour réduire de 50 % le bilan carbone d'un trajet

D'autant que plusieurs technologies véliques sont déjà sur le marché. Certains armateurs se sont tournés vers les voiles textiles, rappelant les navires d'antan, tel Grain de Sail, dont le voilier-cargo, un deux-mâts de 24 mètres, transporte du cacao et du café au seul souffle du vent depuis 2020. D'autres emploient des systèmes plus récents, ressemblant plutôt à de hauts cylindres en rotation, adaptés à des navires de grande taille. C'est le cas des rotors, qui utilisent l'effet Magnus – la mise en rotation du cylindre génère une dépression et une surpression de part et d'autre, créant une poussée aérodynamique – ou des profils aspirés, appelés aussi turbovoiles: utilisée par le commandant Cousteau pour ses bateaux le *Moulin à vent* et l'*Alcyone*, la turbovoile optimise l'écoulement de l'air par un système d'aspiration le long du profil, afin de créer là aussi une poussée aérodynamique. Pour entrer en rotation, ces deux systèmes doivent néanmoins être alimentés par une énergie extérieure et ne sont utilisés qu'en complément d'une motorisation classique. L'économie de carburant est de 20 % à 30 %.

Il existe également différents types d'ailes rigides ou semi-rigides, qui sont rétractables et orientables selon la direction du vent, et offrent même la possibilité d'être utilisées comme unique source de propulsion. Elles peuvent atteindre des dimensions bien supérieures à celles des voiles textiles. On peut aussi citer l'aile de kite, déployée sur de grands navires tels que le roulier *Ville de Bordeaux*. Ce cerf-volant automatisé permet de réduire de 20 % en moyenne la consommation de carburant. Il capte les vents en hauteur et aide à tracter le cargo. Avantage: il ne prend pas de place et ne réduit pas l'espace dédié aux conteneurs. Mais il ne suffit pas à déplacer un cargo. « *On devrait rapidement disposer d'évaluations techniques et économiques sur ces technologies, ce qui aidera à convaincre les armateurs de l'intérêt d'un tel investissement* », note Lise Detrimont, qui déplore toutefois un manque de volontarisme politique.

Z&B

« AVEC LA RARÉFACTION DES CARBURANTS FOSSILES, LA PROPULSION VÉLIQUE DEVIENDRA PLUS COMPÉTITIVE. LE PRIX DU VENT NE CHANGE PAS AU FIL DU TEMPS ! »

Nils Joyeux, président de Zéphyr & Borée

Quand il a lancé Zéphyr & Borée, Nils Joyeux a peiné à trouver des clients prêts à financer de tels projets. « *Certes, il est plus cher d'utiliser nos navires que les bateaux conventionnels,* reconnaît-il. *Mais notre prix devrait rester stable à l'avenir; avec les futures réglementations et la raréfaction des carburants fossiles, il deviendra même plus compétitif. Le prix du vent ne change pas au fil du temps!* » L'entreprise, connue pour avoir développé le cargo à voile *Canopée* du constructeur de lanceurs spatiaux ArianeGroup, s'implique dans plusieurs chantiers comme la construction de trois porte-conteneurs à voile de 160 mètres. Ces navires devraient permettre d'abaisser de 50 % le bilan carbone du trajet grâce à des ailes rigides et à une vitesse réduite à 11 nœuds. Choix qu'a également fait la compagnie Neoline, dont le premier navire à voile est en construction. « *Diminuer la vitesse de 15 à 11 nœuds divise par deux les besoins en énergie,* décrit son président, Jean Zanuttini. *Le vent assure 60 à 70 % de l'énergie nécessaire grâce à une aile de 1500 mètres carrés.* » Il vise une économie de carburant supérieure à 80 %. « *Avec le prix du baril tel qu'il est aujourd'hui, peu cher et détaxé, et compte tenu du fait qu'il n'existe pour l'instant aucune valorisation de ces réductions d'émissions de CO_2 sous forme, par exemple, de crédit carbone, nous sommes à peu près au même prix que les navires de taille équivalente,* souligne-t-il. *Mais nos concurrents sont bien plus grands: les rouliers font en moyenne 200 mètres quand le nôtre en fera 130. Sans parler des immenses porte-conteneurs.* » Plusieurs chargeurs se sont néanmoins engagés avec Neoline afin d'acheminer une part non négligeable de leur fret vers les États-Unis, attirés par l'engagement environnemental et les avantages logistiques proposés. D'autre part, même si la ressource en vent peut sembler aléatoire, grâce à des logiciels performants qui adaptent la route aux conditions météorologiques, les armateurs peuvent s'engager sur la ponctualité de leur trajet.

Des voiles pour décarboner la mer... Mais est-ce suffisant? Pour économiser l'énergie, le véritable problème ne serait-il pas celui du gigantisme des navires et, plus globalement, du modèle de surconsommation auquel ils participent?

SYLVIE NADIN

Le site de l'association Wind Ship: wind-ship.fr

Autour de nous, un gisement de milliwatts

Qui dit mouvements, vibrations, chaleur… dit énergie ! Des chercheurs réussissent à exploiter celle des ondes radio ou même du corps humain pour alimenter des objets sans fil et sans pile. Avec toutes sortes d'applications.

C'est sans doute un horloger suisse, Abraham Louis Perrelet, qui inventa, en 1777, la montre à « remontage automatique ». Chahutée par les mouvements de son utilisateur, elle récoltait à longueur de journée un peu d'énergie mécanique grâce à une petite masse oscillante dont la rotation, démultipliée, remontait le ressort du mécanisme. Mais ce n'est que dans les années 1920, avec l'avènement de la montre-bracelet, que se répand la « montre automatique » qu'il est inutile de remonter tant qu'on la porte au poignet. En 1986, Seiko l'adapte à l'ère de l'électronique : les mouvements du poignet font cette fois tourner une petite dynamo, qui recharge la batterie de la montre à quartz.

Ces montres faisaient appel, avant la lettre, à la technique de « récupération » ou « récolte d'énergie » (*energy harvesting* en anglais), un thème de recherche désormais reconnu, avec ses publications et ses conférences. L'idée est de rendre autonomes énergétiquement des dispositifs électroniques isolés en leur permettant d'extraire de leur environnement les quelques milliwatts, voire microwatts nécessaires à leur fonctionnement. Il s'agit souvent d'objets connectés, dotés de capteurs, destinés à émettre par la voie des ondes des informations sur leur état, leur environnement ou leur position. « *Des objets "sans fil et sans pile",* explique Sébastien Boisseau, responsable du Laboratoire autonomie et intégration de capteurs (LAIC) du CEA-Leti à Grenoble, *qui peuvent être utilisés notamment dans des environnements contraints ou difficilement accessibles.* » Et qui gagnent à s'affranchir du remplacement périodique d'une pile. Comme le capteur Enertire de la société israélienne Enervibe qui, à l'intérieur d'un pneu, mesure en temps réel sa pression de gonflage et la transmet au tableau de bord d'un camion. Les applications sont nombreuses : supervision d'installations industrielles, surveillance de flottes, optimisation énergétique des bâtiments, *monitoring* de la qualité de l'air, contrôle du trafic, détection des feux de forêt… et jusqu'aux implants bioniques.

La source d'énergie exploitée est le plus souvent de nature mécanique : mouvements, vibrations, déformations… L'équipe de Sébastien Boisseau a conçu de multiples dispositifs de ce type, dont certains ont fait l'objet d'un transfert de technologie vers un industriel. Le groupe français Legrand a ainsi lancé en 2021 un « interrupteur sans fil » à vocation domotique, reposant sur une technologie élaborée au sein du CEA. L'énergie fournie par le doigt qui appuie sur l'interrupteur est transformée en électricité, qui elle-même alimente une puce capable d'émettre un signal destiné à un récepteur contrôlant un éclairage ou tout autre appareil. Cet interrupteur peut donc être installé n'importe où, sans câble. Son mécanisme est électromagnétique : le mouvement linéaire provoque la rotation d'un petit aimant, qui induit un courant dans un bobinage.

Un pacemaker qui se recharge grâce aux battements du cœur

L'énergie mécanique récoltée peut également résulter de l'écoulement d'un fluide. La société française Solem, spécialiste de l'arrosage, propose depuis quelques mois un contrôleur d'électrovannes pilotable à distance, sans fil, dont la batterie est rechargée par un hydrogénérateur conçu par l'équipe du CEA. C'est la bonne vieille recette de l'énergie hydroélectrique, mais en miniature : cette microturbine fournit 20 milliwatts au prix d'une infime baisse de pression (0,1 bar).

CEA-LETI-SHUTTERSTOCK/MONTAGE BERNARD MARTINEZ

Une deuxième façon de convertir le mouvement en électricité fait appel à des matériaux piézoélectriques – qui ont la propriété de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique. *« C'est la solution que nous avons choisie pour développer, dans le cadre d'un partenariat avec Rossignol, un dispositif capable de transmettre en temps réel des mesures issues de capteurs dans un ski »,* indique Sébastien Boisseau. Objectif double : évaluer la technique du skieur et l'état du ski. Ce sont alors les déformations et les vibrations du ski qui produisent l'énergie nécessaire au fonctionnement du dispositif. Une technologie testée à l'occasion du Championnat du monde de ski alpin 2023 à Courchevel.

Troisième voie explorée pour récupérer de l'énergie mécanique : l'électrostatique, dans laquelle le mouvement latéral de plaques conductrices chargées électriquement, séparées par une infime couche isolante, provoque des déplacements d'électrons. Une variante fait appel à des couples de matériaux triboélectriques, qui ont la propriété de générer des charges électriques lorsqu'ils sont frottés l'un contre l'autre. *« L'avantage de l'approche électrostatique, c'est que la miniaturisation est très facile, alors que l'on rencontre des difficultés pour fabriquer des matériaux piézoélectriques de quelques microns d'épaisseur,* signale Élie Lefeuvre, professeur à l'université Paris-Saclay et chercheur au Centre de nanosciences et de nanotechnologies (C2N). *Elle est donc intéressante pour une application comme les stimulateurs cardiaques, qui nécessitent une dizaine de microwatts. »* Les pacemakers les plus récents sont en effet insérés à l'intérieur même du cœur. Lorsque leur pile rend l'âme, après cinq ou sept ans, on ne sait pas les explanter. On implante donc un second stimulateur, parfois un troisième. Remplacer la pile par un dispositif de récupération d'énergie des mouvements du cœur est donc intéressant, *a fortiori* s'il permet de réaliser un implant très peu encombrant. *« Nous avons déjà conçu un dispositif piézoélectrique qui occupe un demi-centimètre cube,* ajoute le chercheur. *On le retrouve aujourd'hui dans un stimulateur de la société Cairdac qui mesure 0,8 centimètre cube. Mais nous travaillons aujourd'hui sur une solution électrostatique qui permet d'obtenir le même résultat dans un quart de centimètre cube. Les essais précliniques doivent commencer dans quelques mois. »*

Les vibrations et déformations générées par la glisse alimentent en électricité un capteur. Celui-ci transmet à un smartphone des informations sur la technique du skieur.

Une autre forme d'énergie ambiante susceptible d'être récoltée est la chaleur. Plus précisément, un différentiel de température entre deux points peut être exploité grâce à l'effet Seebeck. Ce phénomène physique fait apparaître une différence de potentiel à la jonction de deux matériaux conducteurs de chaleur soumis à un écart de température. *« Il y a eu un engouement pour cette approche,* assure Élie Lefeuvre. *Mais les matériaux efficaces connus sont, selon le cas, rares, chers, instables* ◆◆◆

ENS PARIS-SACLAY

« NOUS AVONS CONÇU UN DISPOSITIF PIÉZOÉLECTRIQUE D'UN DEMI-CENTIMÈTRE CUBE ALIMENTÉ PAR L'ÉNERGIE PRODUITE PAR LES MOUVEMENTS DU CŒUR »

Élie Lefeuvre, professeur à l'université Paris-Saclay et chercheur au Centre de nanosciences et de nanotechnologies

Les pas des visiteurs de la Fête des lumières de Berlin, en 2017, ont été convertis en énergie électrique qui a alimenté l'éclairage. Une technique gadget proposée par l'entreprise britannique Pavegen.

DAVID HEERDE/SHUTTERSTO/SIPA

L'humain, petite centrale électrique

Le corps d'un adulte moyen libère chaque jour une énergie de trois kilowattheures. Un petit gisement que le California Fitness Club de Hong-Kong a probablement été l'un des premiers, en 2007, à exploiter, transformant les efforts fournis sur les tapis de course et autres vélos en énergie destinée à son éclairage. Depuis, l'idée a fait son chemin, puisqu'un fabricant comme SportsArt, à Seattle (États-Unis), propose toute une gamme de tapis roulants, vélos elliptiques et autres instruments de torture, qu'il suffit de brancher sur le secteur pour récupérer l'électricité verte produite par les adeptes de la musculation et du *cardio-training*. L'entreprise londonienne Pavegen commercialise quant à elle des dalles triangulaires qui produisent de l'électricité lorsqu'on marche dessus : un enfoncement de quelques millimètres provoque la rotation d'une minuscule dynamo… Ainsi, sur le parvis de la gare de Saint-Omer, dans le Pas-de-Calais, quinze dalles arpentées chaque jour par quelque 5 000 personnes permettent d'alimenter une partie de l'éclairage et des bornes de recharge USB. La firme revendique 250 installations dans 36 pays, sur des lieux publics très fréquentés mais aussi… des pistes de danse. Le coût de cette solution la réserve cependant à des opérations de communication. Plus délicate est la récupération d'énergie directement sur le corps. Mithras Technology, jeune pousse issue de l'École polytechnique fédérale de Zurich, s'appuie sur l'effet Seebeck pour exploiter l'écart de température entre notre peau et l'air ambiant afin d'alimenter montres connectées ou dispositifs médicaux. Quant à la chaussure génératrice d'électricité, qui fait l'objet depuis vingt ans de brevets et de prototypes, elle n'est pas encore en magasin. Pas plus que les vêtements incorporant des fibres piézoélectriques, capables – promet-on – de recharger notre smartphone grâce aux simples mouvements du corps…

◆◆◆ *ou toxiques. Et c'est une solution difficile à miniaturiser.* » Cette technologie trouve néanmoins des applications industrielles, et même domestiques, puisque la société allemande Micropelt propose par exemple une électrovanne thermostatique permettant de piloter n'importe quel radiateur à distance.

Moissonner de l'énergie chimique dans le corps humain

La récolte d'énergie ambiante peut aussi exploiter des ondes électromagnétiques, à commencer par la lumière. Dans un contexte agricole, un capteur, d'humidité par exemple, peut ainsi recharger ses batteries grâce au soleil. Pour des dispositifs sobres, c'est également une solution en intérieur et sous éclairage artificiel. Plus acrobatique est la récolte dans les ondes radio : l'énergie accessible est minime et dépend de la taille de l'antenne. Il y a trois ans, une équipe de l'Institut de technologie de Géorgie, aux États-Unis, décrivait cependant, dans la revue *Scientific Reports*, un dispositif capable de collecter six microwatts à une distance de 180 mètres d'une antenne 5G. Dans certains contextes, enfin, on peut envisager de moissonner de l'énergie chimique. Notamment dans le corps humain. Philippe Cinquin, chercheur au laboratoire Recherche translationnelle et innovation en médecine et complexité (TIMC) de l'université Grenoble Alpes, a mis au point en 2014 une « biopile » dans laquelle des enzymes présentes au niveau des électrodes oxydent le glucose et réduisent l'oxygène, ce qui génère un flux d'électrons récolté par un circuit électronique. Dans le même laboratoire, Abdelkader Zebda testait en 2019 un prototype plus efficace sur des rats. Car, pour alimenter un jour certains organes bioniques, comme un rein artificiel, ce ne sont plus des milliwatts qu'il faudra trouver, mais des watts. **PIERRE VANDEGINSTE**

LYDÉRIC BOCQUET
Directeur de recherches CNRS, professeur à l'École normale supérieure, titulaire de la chaire annuelle Innovation technologique Liliane Bettencourt au Collège de France en 2022-2023

« La start-up oblige à respecter le principe de réalisme économique »

Utiliser la différence de salinité entre mers et fleuves pour libérer une énergie propre, c'est l'un des défis de ce physicien qui a, pour rapprocher la recherche de l'industrie, contribué à la création de quatre start-up.

ERIC TSCHAEN/REA

Dans le cadre de vos recherches sur les fluides, en particulier à l'échelle nanométrique, vous avez cofondé en 2015 une start-up, Sweetch Energy, qui développe une technologie destinée à créer une énergie renouvelable dite « osmotique ». De quoi s'agit-il ?
L'énergie osmotique est libérée, sous forme de chaleur, par la différence de salinité entre les eaux douces et salées qui se rencontrent dans les estuaires et les deltas des fleuves. Dès les années 1950, on a tenté de capturer à travers une membrane une partie de cette énergie chimique, portée par les ions qui forment le sel. Ceci, afin de la transformer en électricité. Sweetch Energy s'inspire de travaux publiés par mon équipe en 2013, lorsque nous avons découvert que, si elle est réalisée dans certains types de matériaux, une membrane percée de nanopores permet d'accélérer le transfert des charges électriques et de récupérer davantage d'énergie qu'une membrane classique. Sweetch Energy vient ainsi de dépasser une puissance électrique de cinq watts par mètre carré de membrane, avec des membranes à base de cellulose, donc biosourcées : c'est un seuil de rentabilité. Le point clef, c'est qu'on peut en compacter des millions de mètres carrés dans une installation.

Quel est le potentiel de cette source d'énergie ?
Pas du tout anecdotique, puisqu'on l'estime, à l'échelle mondiale, entre 1 000 et 2 000 gigawatts. L'équivalent de 1 000 à 2 000 réacteurs nucléaires ! C'est une énergie renouvelable, sans émission de CO_2, et permanente, contrairement à l'éolien ou au solaire. En France, par exemple, le potentiel du delta du Rhône est estimé à 500 mégawatts. Sweetch Energy s'est rapproché de la Compagnie nationale du Rhône et d'EDF pour construire cette année, sur l'écluse de Barcarin (Bouches-du-Rhône), un prototype qui montera progressivement en puissance, car les modules de membranes s'empilent comme des briques de Lego.

Vous travaillez aussi sur le dessalement de l'eau de mer. Dans ce domaine, le potentiel de la nanofluidique est loin d'avoir été exploré…
Prenons un exemple : le rein filtre 200 litres de sang par jour avec une efficacité extraordinaire. Il ne consomme pour ce faire que l'énergie d'un morceau de banane… Nous ne saurons pas recréer des objets aussi complexes, mais nous pouvons nous en inspirer pour des procédés nouveaux. Le dessalement exige aujourd'hui des quantités extraordinaires d'énergie, des pressions de 70 bars (70 fois la pression atmosphérique), et il n'est rentable qu'avec de gigantesques usines. Mon équipe a montré qu'en utilisant des membranes percées de nanopores, il suffit de quelques volts, soit la tension d'une simple pile ! On pourra donc construire des installations beaucoup plus petites et faciles à entretenir, et néanmoins rentables. C'est le but d'Ilion Water, une start-up en cours de création.

Vous avez participé à la création de quatre start-up. Quel est le rôle de ce type d'entreprise en aval des recherches fondamentales ?
Transformer des recherches académiques en technologies utiles à la société peut être extrêmement long et compliqué. La start-up est un outil qui permet d'accélérer le processus. Elle oblige à respecter le principe de réalisme économique : c'est une condition nécessaire pour qu'une idée scientifique puisse avoir un impact réel sur le monde.

PROPOS RECUEILLIS PAR DENIS DELBECQ

Lydéric Bocquet, *La Mécanique moléculaire des fluides : un champ d'innovation pour l'eau et l'énergie,* Collège de France/Fayard, 2023

ÉNERGIES DE DEMAIN OU… DE JAMAIS ?

Fusion nucléaire, photosynthèse artificielle et biocarburants : toutes ces solutions qui promettent de l'énergie illimitée sont dans les tuyaux depuis des décennies. Mais leur mise au point technologique ou leur crédibilité économique se font attendre.

Depuis des décennies, c'est le même refrain. On nous promet un nucléaire plus sûr et sans déchets, des systèmes capables de transformer l'énergie solaire en énergie chimique comme le font les plantes, des carburants neutres en carbone… Et des solutions existent, du moins dans la littérature scientifique. Alors, pourquoi ne sont-elles pas sur le marché ?

En matière de développement technologique, dire « eurêka » ne suffit pas. Entre une idée et son déploiement, le parcours est long, souvent sinueux, toujours incertain. Prenons la fusion nucléaire *(lire l'encadré p. 67)* : on en parle depuis les années 1950. À l'occasion de la première conférence Atoms for Peace, en 1955, le physicien nucléaire indien Homi J. Bhabha l'assurait : *« J'ose prédire qu'une méthode sera trouvée pour libérer l'énergie de fusion de manière contrôlée dans les deux prochaines décennies. »* Soixante-dix ans plus tard, on n'a toujours pas « mis le soleil en bouteille » de manière industrielle. Thierry Pussieux, directeur délégué à la coordination du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) pour le projet Iter – instrument expérimental de fusion –, explique : *« Il a fallu imaginer les technologies capables de créer les conditions de la réaction thermonucléaire et de les maintenir dans la durée. »* Tout en consommant moins d'énergie que la réaction n'en produit. Un tel système n'existe pas encore…

Podcast de l'Agence Science-Presse, « L'économie des promesses technologiques », https://sciav.fr/promesses

Pierre Papon, *Énergie : la science peut-elle changer la donne ?*, Humensis, 2012

Documentaire de Lucas Gries et Oliver Schmidt, *Fusion nucléaire, les promesses d'une énergie*, Arte, disponible jusqu'au 27/02/2025, https://sciav.fr/fusion

Le premier plasma d'Iter ne verra pas le jour avant… 2033

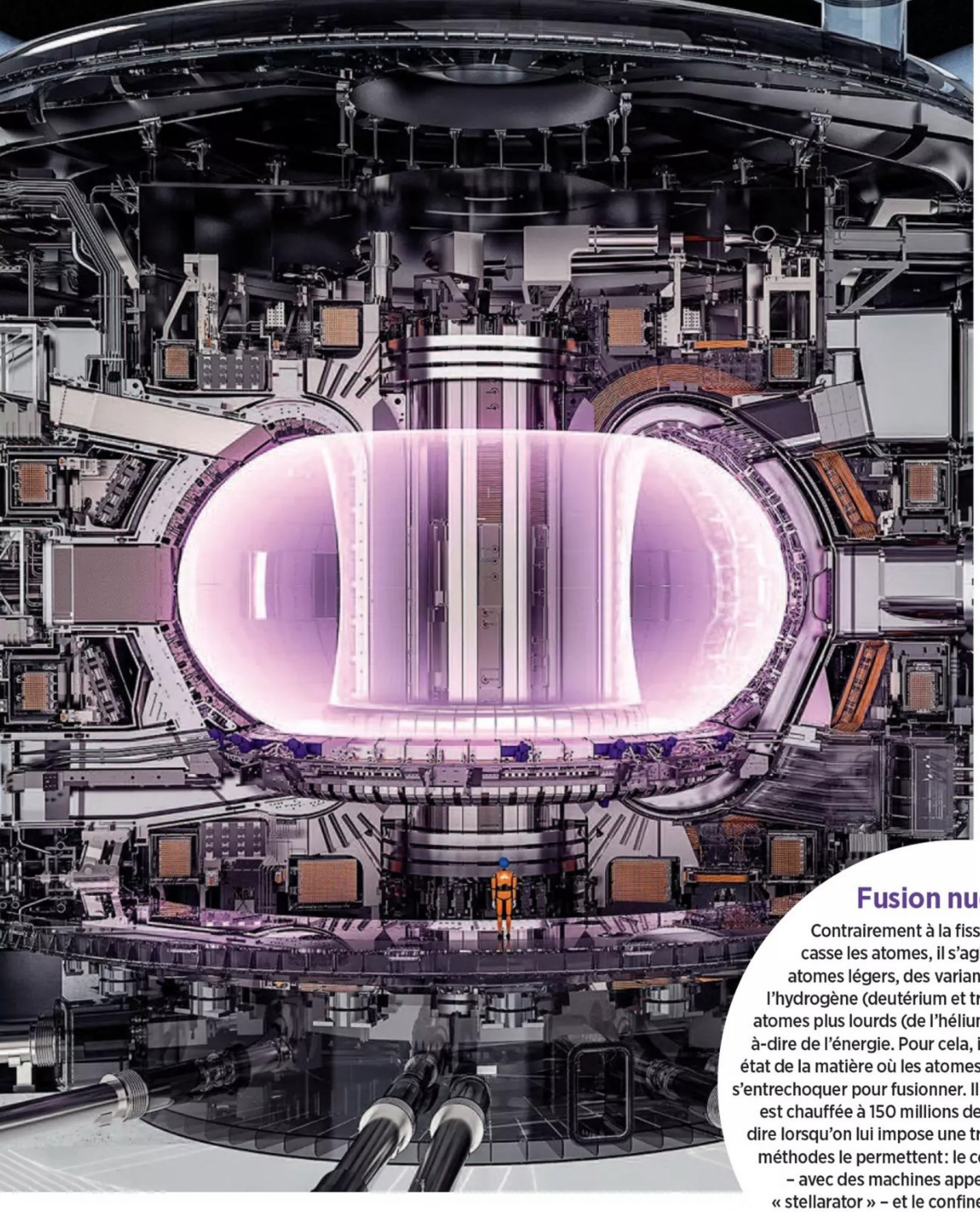
Le premier système de recherche à vocation de production énergétique était européen : Joint European Torus (JET), un réacteur par confinement magnétique installé à Abingdon (Royaume-Uni). En novembre 1991, il a produit la première fusion contrôlée de l'histoire de l'humanité. Elle a duré une seconde. En 1997, JET a battu ses propres records en produisant 22 mégajoules avec une réaction de 5 secondes. Le ratio entre l'énergie injectée pour produire le plasma et l'énergie générée par la réaction thermonucléaire était alors de 0,65 ; bien loin des résultats supérieurs à 1 indispensables à tous les systèmes de production énergétique.

Le meilleur ratio a été enregistré au National Ignition Facility (NIF) de Livermore (Californie), une installation militaire du département de l'Énergie américain. Il utilise le confinement inertiel pour produire la fusion. *« Le NIF n'a pas pour vocation première de produire de l'énergie. Il s'inscrit*

THIERRY PUSSIEUX

« DE TRÈS NOMBREUSES START-UP SE LANCENT DANS LA FUSION. MAIS LES PROMESSES AVANT 2050 NE SEMBLENT PAS RÉALISTES »

Thierry Pussieux, directeur délégué à la coordination du CEA pour le projet Iter



Lancé en 2007, le chantier du réacteur à fusion thermonucléaire Iter pourrait s'achever, dans sa première phase, en 2033 au plus tôt. Ici, une vue d'artiste représentant le plasma de fusion. L'échelle est donnée par le personnage orange au premier plan.

ITER

Fusion nucléaire

Contrairement à la fission nucléaire, qui casse les atomes, il s'agit de fusionner des atomes légers, des variants – ou isotopes – de l'hydrogène (deutérium et tritium) pour former des atomes plus lourds (de l'hélium) et des neutrons, c'est-à-dire de l'énergie. Pour cela, il faut créer un plasma, un état de la matière où les atomes sont très libres et peuvent s'entrechoquer pour fusionner. Il apparaît lorsque la matière est chauffée à 150 millions de degrés Celsius, c'est-à-dire lorsqu'on lui impose une très grande pression. Deux méthodes le permettent: le confinement magnétique – avec des machines appelées « tokamak » ou « stellarator » – et le confinement inertiel – où des lasers produisent des ondes de choc qui compriment la matière par inertie.

dans le programme de dissuasion nucléaire des États-Unis », précise Thierry Pussieux. Il a généré 1,5 fois plus d'énergie qu'il n'en avait reçue, par deux fois, en décembre 2022 et juillet 2023. Mais la réaction n'a duré que quelques milliardièmes de seconde…

Prochaine étape: Iter. Basée à Cadarache (Bouches-du-Rhône), cette installation de recherche rassemble 35 nations déterminées à construire le premier réacteur capable de produire une fusion pendant plus de 400 secondes, avec un ratio d'efficacité de 10. *« C'est le premier du genre! Et c'est là que réside toute la difficulté. Personne n'a jamais construit une telle machine »*, insiste Thierry Pussieux. Le chantier, titanesque, connaît des retards, liés au développement technologique, à des pièces défectueuses, à l'assemblage de structures produites indépendamment, car chaque nation contribue au projet en fabriquant certains éléments. *« Le génie des procédés, c'est-à-dire la science de la manière dont on rend possibles les choses, est souvent oublié »*, analyse Claire Le Renard, sociologue à l'École nationale des ponts et chaussées.

Le premier plasma, initialement prévu en 2025, ne verra pas le jour avant 2033. Pour la production d'énergie à plein régime, ◆◆◆

◆◆◆ la nouvelle échéance est… 2036. Et les habitants de la région n'en verront pas un électron. « *Ce n'est pas un démonstrateur de production énergétique, mais une installation de recherche visant à en prouver la faisabilité* », rappelle Thierry Pussieux. Ses données permettront à d'autres de démarrer les premiers démonstrateurs industriels, les « démos ». En Chine, on devine sur les images satellite que les fondations du projet Best sont creusées. Au Royaume-Uni, la construction du démo Step est annoncée à West Burton à partir de 2030. Quant au programme européen, il a déjà un nom – original ! –, Demo. Et les nations ne sont pas les seules à s'engager. « *De très nombreuses start-up se lancent dans la fusion. Cela accélère les développements, mais les promesses avant 2050 ne semblent pas réalistes* », tempère Thierry Pussieux. Suivez son regard vers Commonwealth Fusion System, une entreprise qui a levé plus de 1,5 milliard d'euros auprès de Bill Gates et Google et qui claironne que la construction de son réacteur commercial débutera en 2025.

La feuille artificielle est restée un objet de laboratoire

« *Fake it until you'll make it* » (« Faites semblant jusqu'à ce que ça marche »), dit l'aphorisme. Car en matière de développement technologique, les promesses n'engagent que ceux qui y investissent. Les supporteurs de la feuille artificielle de Daniel Nocera ne diront pas le contraire. Ce chercheur du Massachusetts Institute of Technology (MIT) a fait les gros titres de la presse scientifique au début des années 2010 avec un système de photosynthèse artificielle *(lire l'encadré ci-dessous)*. Éric Puzenat, chimiste à l'Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon (IrceLyon), se souvient : « *Il était très prolixe sur son concept, apportant de nombreuses explications théoriques. Mais quand on a essayé de reproduire ses expériences, on n'a pas obtenu les mêmes rendements.* » Et la feuille artificielle de Daniel Nocera est restée un objet de laboratoire…

Le concept n'est pas enterré pour autant. Les promesses de la photosynthèse artificielle sont trop belles. Alors qu'un panneau photovoltaïque convertit environ 20 % de l'énergie solaire reçue, « *avec la photosynthèse artificielle, il n'y a pas de limites physiques fondamentales*, assure Yulia Pushkar, biophysicienne au Collège des sciences de l'université de Purdue (Indiana). *On peut très facilement imaginer un système efficace à 60 %, car il existe déjà un précédent avec la photosynthèse naturelle.* » Mais de nombreux problèmes demeurent. D'abord, la photosynthèse produit du dioxygène, ce qui oxyde les systèmes électroniques. Pour y remédier, il est possible d'évacuer rapidement les produits de la réaction, avec des membranes par exemple, mais cela réduit le rendement global. Autre écueil : la lumière. Contrairement aux plantes, les matériaux disponibles pour fabriquer des réacteurs de photosynthèse – sorte de puces non pas électroniques, mais

JEAN-CLAUDE MOSCHETTI/ALGOSOLIS/CNRS IMAGES

Les microalgues trouvent des applications dans les biocarburants, la chimie verte, la cosmétique, la nutrition ou encore la santé. Ici, le laboratoire AlgoSolis expérimente la culture de l'espèce *Nannochloropsis*, destinée à la production de biodiesel.

Photosynthèse artificielle

Pour vivre, les plantes utilisent une énergie chimique produite par photosynthèse, en associant du CO_2, une molécule d'eau et la lumière du soleil. La photosynthèse artificielle s'inspire de cette réaction. Il s'agit de produire une molécule contenant davantage d'énergie que les composés initiaux avec un mélange de CO_2, d'eau et de lumière. En anglais, on résume ce procédé par l'expression *« power to chemical »*, la conversion de l'énergie en produits chimiques, faciles à stocker et à intégrer dans l'industrie, comme du méthanol ou de l'hydrogène.

PHANIE

La photosynthèse artificielle pourrait fournir de l'hydrogène « propre », du méthane ou d'autres molécules riches en énergie.

Biocarburants de 3e génération

Après les biocarburants issus des plantes cultivées à cette fin (première génération), après ceux qui utilisent les rares déchets agricoles (deuxième génération), la recherche mise tout sur les biocarburants de troisième génération, produits à partir d'algues ou d'autres micro-organismes. L'avantage des algues: elles sont riches en lipides – autant de réserves d'énergie – et se développent rapidement. Elles épargnent les terres agricoles, leur culture n'entrant pas en compétition avec le système alimentaire. Pour les transformer en carburants, il existe deux solutions: soit par digestion enzymatique, comme n'importe quelle forme de biomasse, pour produire du méthane ou d'autres composés énergétiques; soit en détournant leur métabolisme pour qu'elles produisent elles-mêmes des molécules à haute valeur énergétique.

photochimiques – n'utilisent pas la quasi-totalité du spectre lumineux. « *La plupart de nos matériaux captent bien la lumière entre les UV et les longueurs d'onde de lumière bleue, mais avec de mauvais rendements*, précise Éric Puzenat. *On peut aussi utiliser des semi-conducteurs qui incorporent une plus large gamme de longueurs d'onde, mais dans ce cas, une partie de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur ou d'onde acoustique.* »
Pour le spécialiste, « *il faut une rupture, une découverte incroyable, très probablement de nouveaux matériaux ou composés* ».
Et désormais, on doit penser à l'impact environnemental des innovations. « *Aujourd'hui on prête attention à la disponibilité des éléments que l'on utilise, à leur facilité d'accès géologique ou géopolitique. Si l'on imagine déployer de la photosynthèse artificielle à grande échelle, il faudra de grandes surfaces, de grandes quantités de matériaux. Il est essentiel de l'anticiper* », admet Éric Puzenat.

Un premier vol transatlantique propulsé intégralement aux biocarburants

Les énergies de demain ne sont à l'évidence pas confrontées aux mêmes défis que celles d'hier. Elles doivent concurrencer les systèmes existants. C'est ce qui entrave l'arrivée des biocarburants dits « de troisième génération », produits à partir d'algues ou de déchets organiques. Lorsque le prix du pétrole était à son maximum, en 2008, d'importants résultats scientifiques ont été établis. Le défi n'est plus là. « *Techniquement, on y est* », résume ainsi Dorothée Laurenti, chimiste à IrceLyon. On sait même produire des carburants durables d'aviation, comme l'illustre le premier vol transatlantique (Londres-New York) propulsé intégralement aux biocarburants (à base d'huile de cuisson usagée), le 28 novembre 2023. Tout est prêt ? Non. « *Ces techniques coûtent très cher,* reconnaît la chercheuse. *Et si l'on prend en compte tout le procédé, on émet autant de CO_2 qu'avec des énergies fossiles.* » Jean-Paul Cadoret, spécialiste des microalgues, précise: « *La réglementation et les financeurs imposent des normes très strictes quant à l'impact environnemental. Impossible de concurrencer le pétrole dans ces conditions.* » Les nouveaux procédés doivent démontrer leur supériorité sur les fossiles sur tous les plans, y compris économique. « *Produire, à partir de microalgues, des huiles à 30 ou 40 euros le litre pour les brûler, ça n'a pas de sens* », reconnaît Jean-Paul Cadoret. « *Une solution est d'exploiter les algues pour élaborer un produit à forte valeur ajoutée, comme un principe actif cosmétique, et d'utiliser le reste pour les biocarburants* », complète Dorothée Laurenti. De très nombreuses start-up se sont engagées dans cette voie. Les procédés de transformation demandent aussi à être optimisés. « *Nous avons besoin de la volonté industrielle pour nous projeter dans les prochaines étapes du développement des biocarburants, tel le changement d'échelle* », souffle la chercheuse.
Les pétroliers sont en ligne de mire. Non seulement les biocarburants peuvent remplacer certains de leurs produits, mais ils leur empruntent aussi des infrastructures, comme à la Mède, près de Marseille, où TotalEnergies a reconverti une de ses raffineries en bioraffinerie. Ils présentent les biocarburants comme une clé de leur avenir. « *Mais les industriels ne publient pas leurs résultats, donc ne sait pas trop ce qu'ils font. Est-ce qu'ils effectuent des recherches solides? On n'en sait rien* », poursuit la chimiste. On peut se demander à quel point ces entreprises préparent vraiment la transition… Entre défis scientifiques et concurrences stratégiques, difficile de savoir quelles solutions aboutiront demain.

AGNÈS VERNET

D. LAURENTI

« SI L'ON PREND EN COMPTE TOUT LE PROCÉDÉ DE PRODUCTION DES BIOCARBURANTS, ILS ÉMETTENT AUTANT DE CO_2 QUE DES ÉNERGIES FOSSILES »

Dorothée Laurenti, directrice de recherche à IrceLyon

JEAN-BAPTISTE FRESSOZ
Historien des sciences et de l'environnement, enseignant à l'école des Ponts Paris Tech et à l'École des hautes études en sciences sociales

« Il faut critiquer la notion de transition, car elle empêche de réfléchir à ce qui fâche »

Les énergies et les matières premières ne se remplacent pas les unes les autres : elles s'accumulent au fil du temps, formant des écheveaux inextricables. C'est pourquoi, selon l'historien, parler de transition entre fossiles et renouvelables est un leurre qui empêche de penser une partie de la solution, la sobriété.

Selon vous, il est erroné de considérer l'histoire de l'énergie comme une succession de périodes distinctes : celle du bois, puis du charbon, du pétrole, de l'électricité…
La manière dont on relate l'histoire de la Révolution industrielle, encore dans de récents ouvrages universitaires, revient effectivement à présenter une succession de phases, de transitions, du bois vers le charbon, puis du charbon vers le pétrole. Cette histoire est tout simplement fausse. Et on le sait depuis longtemps : dans les années 1930, déjà, des ingénieurs produisaient des graphiques montrant que les courbes énergétiques s'empilaient les unes sur les autres. Que le charbon soit une énergie clé de la modernité avancée est une évidence : il a connu la plus forte croissance de son histoire entre 1980 et 2010 (+300 %). En 2023, l'Europe en brûle encore 400 millions de tonnes par an, sans compter la masse bien plus importante liée aux biens qu'elle importe.

L'idée de transition énergétique serait donc un leurre ?
En tant que notion historique, oui : les énergies s'empilent, et surtout interagissent. Elles sont codépendantes, en symbiose les unes avec les autres. Prenons l'exemple de l'Angleterre, le cas le plus étudié pour la Révolution industrielle : en 1900, les mines de charbon consomment davantage de bois pour étayer les galeries et extraire le minerai que le pays entier n'en brûlait en 1750 ! Les historiens ont trop souvent considéré les énergies comme étant en compétition : le charbon avec le bois, le pétrole avec le charbon, ou encore les moteurs diesel supplantant les machines à vapeur. Mais c'est une vision partielle, qui occulte l'entraide qu'elles se procurent les unes aux autres. Au XIXe siècle, dans une tonne de charbon, il y a aussi plein de bois, plein de travail humain. Le gaz d'éclairage, lui, est produit à partir de charbon tiré de mines à leur tour grandes consommatrices de bois et d'huiles organiques pour éclairer les galeries. Au XXe siècle, le pétrole ne remplace absolument pas le charbon. Pour une raison simple : toute l'infrastructure du pétrole, de son extraction jusqu'à sa consommation, repose sur de l'acier. Il est pompé dans des tubes en acier, circule dans des pipelines en acier, est transporté dans des bateaux en acier, stocké dans des réservoirs en acier, brûlé dans des moteurs en acier. Or tout cet acier dépend du charbon, indispensable à sa production. En Angleterre, dans l'entre-deux-guerres, pour chaque tonne de pétrole brûlée, il a fallu consommer 2,5 tonnes de charbon afin de produire l'acier qui a permis cette combustion. Les énergies sont des entités symbiotiques, qui forment des écheveaux extrêmement complexes. C'est aussi ce qui rend la décarbonation de l'économie très compliquée.

Comment la notion de transition énergétique est-elle apparue, puis s'est-elle imposée jusqu'à incarner aujourd'hui la solution à la crise climatique ?
L'origine de l'expression est liée à l'atome : elle désigne d'abord le changement d'état d'un électron autour de son noyau avant de devenir un mot-clé de la futurologie énergétique en général. Dans les années 1950, aux États-Unis, les défenseurs de l'atome civil pensent le très long terme : 2000, 2050 ou 2100. Ils envisagent l'épuisement des fossiles et donc un recours indispensable au nucléaire. Et ils sont parmi les premiers à étudier le réchauffement climatique, car ils disposent de spectromètres de masse très précis qui leur permettent de mesurer les proportions des isotopes de carbone et d'oxygène, et donc

> **“MALGRÉ TOUTES LES INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES, ON CONSOMME TOUJOURS PLUS DE MATIÈRES PREMIÈRES”**

FANNY DE GOUVILLE/MODDS

d'étudier de manière fine le cycle du carbone ou les paléotempératures. Dès 1953, un rapport de l'Atomic Energy Commission (AEC) américaine parle d'effet de serre, de hausse du niveau des mers, de fonte des glaciers… Sous leur plume, l'expression « transition énergétique » sert à promouvoir l'atome et le surgénérateur nucléaire comme moyen de s'émanciper du pétrole et du charbon. Dans les années 1970, après le choc pétrolier, l'expression se généralise. Elle est reprise par le président américain Jimmy Carter. Et aussi par le mouvement environnementaliste, qui entend promouvoir les énergies renouvelables et s'oppose au nucléaire. Mais c'est dans les années 2000 que cette notion explose, sans justification sérieuse, comme réponse à la crise climatique et à l'objectif de limiter la hausse de la température globale à deux degrés.

Pourquoi vous semble-t-elle inopérante face au changement climatique ?

Quand on parle de transition énergétique, on met l'accent sur la production énergétique et sur le changement technologique. Or l'histoire montre qu'il ne faut pas exagérer ce qu'on peut attendre des innovations technologiques. On a aujourd'hui tendance à confondre technique et innovation, et à se focaliser sur tout ce qui est nouveau, « innovant » (l'intelligence artificielle), ou fantomatique (l'avion à hydrogène). Face au changement climatique, l'innovation technologique est présentée comme la bouée de sauvetage.

Même dans le rapport 2022 du Giec, expertise officielle sur le climat, la place consacrée à la réduction de notre consommation est tout à fait marginale comparée à celle donnée aux solutions comme l'hydrogène ou la capture et le stockage du carbone. Pourtant, les experts qui travaillent sur l'hydrogène le disent eux-mêmes : c'est très peu pratique et les rendements sont très faibles !

Il faut rappeler que, dans l'histoire, aucune innovation technologique n'a fait disparaître un flux de consommation matérielle. Malgré toutes les innovations technologiques des XIXe et XXe siècles, on consomme une variété toujours plus grande de matières premières, et chacune est consommée de manière croissante. Alors, parler aussi légèrement de l'innovation et de la transition énergétique comme solution à la crise climatique ou environnementale, c'est dire quelque chose d'étrange, jamais vérifié historiquement.

Et cela évite d'évoquer les choses qui fâchent : le niveau de production et de consommation, le nombre d'avions ou de voitures qu'on va construire, etc. En tout cas politiquement, la notion de transition a eu cet effet.

Jean-Baptiste Fressoz, *Sans transition. Une nouvelle histoire de l'énergie*, Seuil, 2024

La transition énergétique prônée pour sortir des fossiles n'a donc pas commencé ?

Aujourd'hui, tout le monde se félicite du fait que la production des énergies renouvelables croît très vite, et effectivement, c'est une bonne nouvelle. Mais les fossiles ne décroissent pas du tout de manière symétrique. Pour l'instant, ils représentent toujours 80 % de la consommation énergétique mondiale. En Chine, on a tout à la fois un envol du solaire et la construction de nouvelles centrales à charbon. Ce qu'on sait faire grâce aux renouvelables, c'est de l'électricité. Mais elle ne représente que 40 % des émissions de gaz à effet de serre. Il reste des obstacles technologiques importants pour la production de matériaux : ciment, acier, plastique, engrais… donc pour les secteurs de l'agriculture, de la chimie, ou encore les transports maritime et aérien.

L'impératif climatique oblige donc à réduire notre consommation, à opérer volontairement une forme d'amputation énergétique pour se défaire de la part de l'énergie mondiale issue des fossiles. C'est pour cela que je trouve important de critiquer la notion de transition énergétique : elle empêche de réfléchir aux choses qu'il faut essayer d'abandonner.

PROPOS RECUEILLIS PAR ÉLIANE PATRIARCA

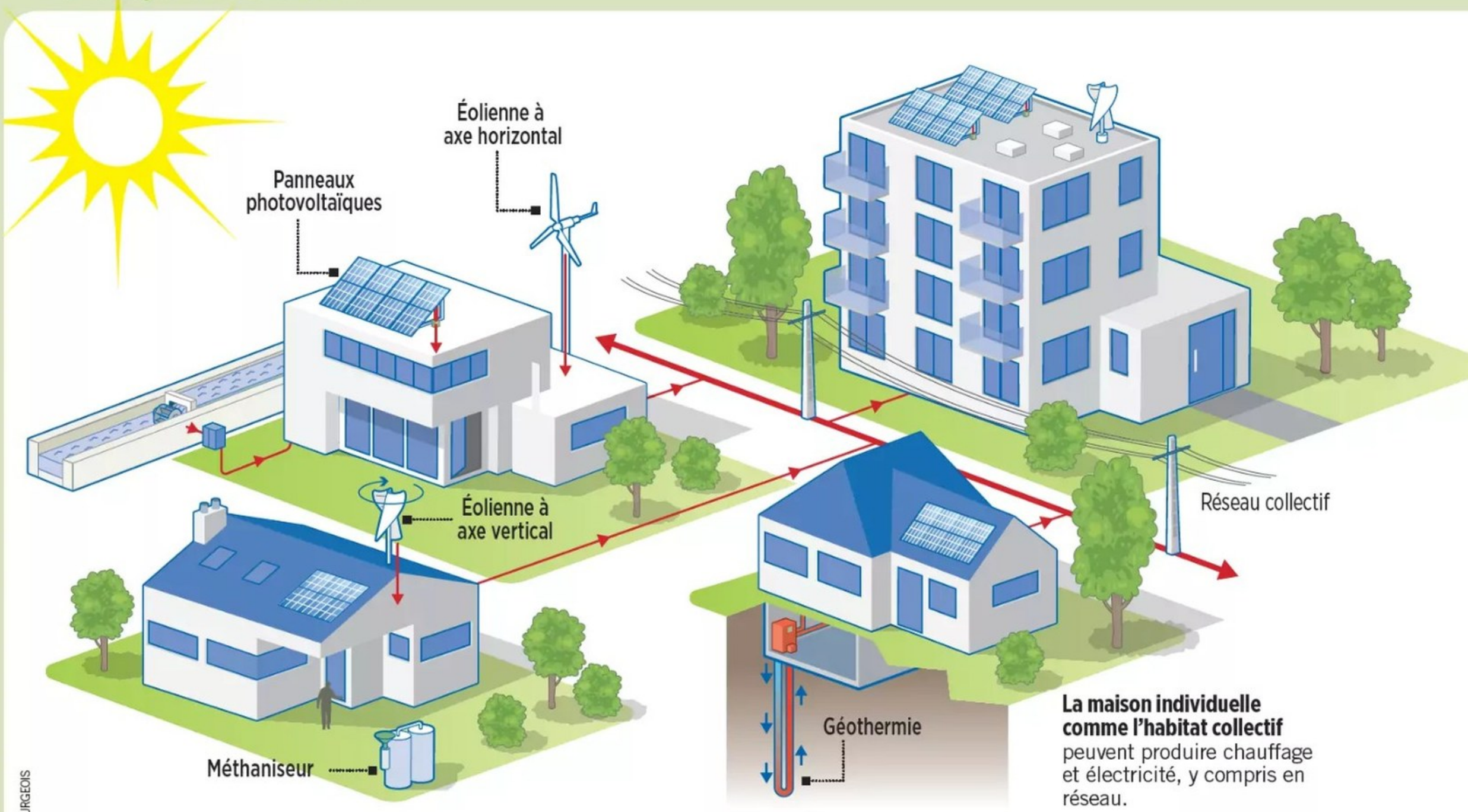
ET MOI je fais quoi ?

Les prix de l'énergie flambent, et le montant des factures avec. Pour réduire ses dépenses , il devient indispensable de maîtriser sa consommation : par des gestes simples et efficaces au quotidien, des équipements peu gourmands ou, si nécessaire, des travaux de rénovation. Mais aussi en installant, chez soi, des dispositifs de production d'énergie renouvelable, permettant de consommer et de vendre sa propre électricité.

FRANCOIS LAURENS/HANS LUCAS

Installation de panneaux solaires sur le toit d'une maison du sud de la France.

EN ROUTE
VERS
NOTRE FUTUR



La maison individuelle comme l'habitat collectif peuvent produire chauffage et électricité, y compris en réseau.

BRUNO BOURGEOIS

On n'est jamais si bien servi que par soi-même

Produire sa propre énergie, c'est maîtriser ses dépenses tout en participant à la lutte contre le réchauffement climatique. Éolien, géothermie, photovoltaïque, méthanisation… plusieurs solutions technologiques sont désormais accessibles aux particuliers.

C'était il y a dix ans. David Hérisson, artisan du bâtiment et électricien installé à Langeais (Indre-et-Loire), osait la transition énergétique. Avec son épouse Cécile, il faisait le choix de l'autonomie alimentaire et énergétique. Le couple vit aujourd'hui dans une maison pleinement autonome, équipée de panneaux solaires, d'un méthaniseur domestique « fait maison », d'un chauffe-eau solaire, d'une cuisinière à bois, et se nourrit la majeure partie de l'année des produits de son potager. *« C'est une approche graduelle, durant laquelle on reconsidère ce qui est essentiel et ce qui ne l'est pas*, explique-t-il. *On se rend compte qu'on peut vivre à la fois dans l'opulence et la sobriété énergétique. »* Entretemps, David et Cécile ont lancé une épicerie bio ainsi que l'association L'APRèS pour l'avenir, à travers laquelle ils accompagnent ceux qui veulent réduire leur empreinte sur le monde. Cette prise d'indépendance énergétique passe avant tout par l'autoconsommation, démarche encadrée légalement par l'Europe depuis 2016, qui consiste à produire et consommer sa propre énergie. Elle peut être individuelle – chacun consomme l'énergie qu'il produit – ou collective, lorsque les consommateurs s'associent à des « producteurs » locaux, comme des entreprises ou des collectivités. *« On comptait 450 opérations d'autoconsommation collective en juin 2024, et ce chiffre double tous les ans »*, explique Arthur Jouannic, cofondateur d'Animergy, bureau d'études en charge du pilotage de tels projets, qui estime que *« d'ici quelques années, tout le monde aura accès à un projet d'autoconsommation collective près de chez soi »*.

L'autoconsommation n'est pas sans rapport avec la crise énergétique mondiale, qui a vu les prix de l'électricité s'envoler (+44 % entre janvier 2023 et février 2024). Elle permet de réduire ses factures mais aussi de contribuer aux objectifs de neutralité carbone fixés par l'Europe d'ici à 2050. Mais comment s'y prendre, dans un marché confus ? Tour d'horizon des solutions technologiques et financières pour s'équiper efficacement, réduire ses factures et renforcer son indépendance énergétique.

Pages réalisées par William Rowe-Pirra
Infographies : Bruno Bourgeois

AUTOCONSOMMATION PHOTOVOLTAÏQUE

Le soleil brille pour tout le monde

Bilan ensoleillé pour l'autoconsommation photovoltaïque en France. Au 1er mai 2024, on dénombrait 490 000 installations! Encore loin toutefois des 4 millions d'installations potentielles projetées par le Réseau de transport d'électricité (RTE). Mais ceux qui veulent rejoindre le mouvement doivent se renseigner soigneusement. Parmi les pièges à éviter, celui des offres alléchantes d'entreprises peu scrupuleuses qui font miroiter des panneaux solaires à 1 euro ou intégralement pris en charge par l'État, car ce sont des escroqueries! Il convient aussi de prêter attention à la nature du matériel: des prix trop bas peuvent trahir une mauvaise qualité. Les kits d'installation homologués par l'État contiennent les panneaux, les micro-onduleurs qui transforment le courant continu en courant alternatif, et les câbles de connexion, qui se branchent sur une prise de courant. Un guide édité par l'Agence de la transition écologique (Ademe) détaille les consignes, mais le recours à un professionnel est obligatoire pour l'installation.

Plusieurs facteurs sont à prendre en compte pour déterminer la taille de son équipement. Il faut décider de la quantité de kilowatts-crête (kWc) voulue, c'est-à-dire la puissance de pointe des panneaux, dans les conditions optimales d'ensoleillement. Selon Engie, les particuliers optent généralement pour une puissance de 3 kWc, ce qui correspond à une pose de 8 panneaux sur 13 mètres carrés, à un prix oscillant alors entre 700 et 1000 euros le mètre carré. Cette quantité est estimée en fonction de la puissance cumulée des appareils électriques qui doivent être utilisés et surtout des habitudes de consommation, selon le moment de la journée et des saisons. Le « talon », par exemple, correspond à la consommation incompressible des appareils qui fonctionnent en permanence, comme le réfrigérateur ou la VMC. Toutes ces informations sont disponibles sur le compte client Enedis des personnes équipées d'un compteur Linky.

L'autoconsommation correspond au pourcentage de la production d'électricité photovoltaïque directement consommé dans la maison – idéalement 100 % –, le surplus pouvant être vendu sur le réseau à un prix fixé au moment du raccordement (le tarif de rachat d'EDF est actuellement de 0,1301 euro pour une installation de puissance inférieure ou égale à 3 kWc). Se tourner vers le solaire implique aussi d'oublier les réflexes des heures creuses. Le mieux est d'utiliser ses appareils durant les pics d'ensoleillement: on charge son téléphone et son ordinateur, on lave son linge et sa vaisselle aux alentours du zénith. En effet, produire de l'énergie, c'est aussi changer ses habitudes de consommation, comme en témoigne Roger Zenss, habitant du Haut-Rhin, propriétaire de panneaux solaires depuis 2009, dans les colonnes du *Journal du photovoltaïque*. Enthousiaste et satisfait, il est d'ailleurs inscrit sur la base de données citoyenne BDPV, qui permet de consulter ce que produisent les installations photovoltaïques dans toute la France et de contacter ceux qui ont franchi le pas.

PRIX D'INSTALLATION
entre 700 et 1000 € par m² pour une puissance de 3 kilowatts-crête (kWc)

RETOUR SUR INVESTISSEMENT
8 ans en moyenne

ÉCONOMIE SUR LA FACTURE
Jusqu'à 60 %

DURÉE DE VIE GARANTIE
25 ans (pour les panneaux)

AIDES
Prime à l'autoconsommation photovoltaïque (à l'investissement, dégressive et variable) ; TVA à 10 % pour les installations d'une puissance inférieure ou égale à 3 kWc

JENS SCHWARZ/LAIF-REA

Selon l'Ademe, le potentiel inexploité sur la toiture des particuliers s'élève à 364 GW.

ÉOLIEN INDIVIDUEL

En quête d'un nouveau souffle

Le petit éolien n'a pas le vent en poupe. En cause ? Un certain nombre d'escroqueries : des installateurs malhonnêtes ont pendant longtemps proposé des dispositifs défectueux à des prix abusifs. Par ailleurs, si les prix du photovoltaïque ont quelque peu diminué ces dernières années, du fait notamment des améliorations techniques, ce n'est pas vraiment le cas pour l'éolien. En outre, les maigres aides disponibles ne rendent pas l'investissement à l'échelle individuelle intéressant. Dans certaines régions, cependant, comme l'Occitanie ou la Normandie, il existe des subventions départementales pour financer un projet. Avant de se lancer, il faut évaluer précisément le potentiel du vent sur son terrain à l'aide d'un mât de mesure équipé d'anémomètres, d'une girouette et d'un enregistreur, qui calcule la vitesse et la direction du vent. Puis comparer ces données à celles des stations de météo locales, et les extrapoler sur plusieurs années afin de déduire la vitesse moyenne du vent chez soi. Si les données sont satisfaisantes, il faut ensuite choisir son type d'éolienne : horizontale ou verticale ? La première, la plus courante, est fixée sur un mât de 8 à 20 mètres de haut (permis de construire nécessaire au-delà de 12 mètres), dans un jardin, et présente les meilleurs rendements. Mais c'est aussi la plus chère et la plus bruyante. La seconde peut se fixer sur le toit, et fonctionne même avec des vents plus faibles, certains modèles pouvant produire de 200 à 1000 kWh par an. Enfin, il reste à opter entre deux types d'installations. L'autonome, qui répond aux besoins énergétiques de l'habitation, nécessite un régulateur avec redresseur intégré, pour transformer le courant alternatif en courant continu, et des batteries pour stocker l'énergie quand le vent ne souffle pas. Quant à l'installation reliée au réseau pour vendre l'électricité produite, elle ne nécessite pas de stockage, mais les coûts de raccordement peuvent atteindre jusqu'à 3 000 euros.

UNÉOLE

Les éoliennes verticales exploitent les vents tourbillonnants des villes (ici, à Roubaix).

PRIX D'INSTALLATION
De 2 500 à 40 000 € selon le modèle d'éolienne

RETOUR SUR INVESTISSEMENT
De 10 à 20 ans

ÉCONOMIES
Peut couvrir 100% des besoins en électricité, hors chauffage et eau chaude

AIDES
Des subventions départementales, régionales ou européennes permettent de réduire l'investissement initial ; TVA à 10 %

COÛT DES TRAVAUX
de forage pour le captage horizontal : 150 €/m²

PRIX MOYEN
De 15 000 à 20 000€

RETOUR SUR INVESTISSEMENT
De 8 à 20 ans (selon le prix du gaz naturel)

AIDES
MaPrimeRénov' (1 200 à 10 000 €) ; Habiter Mieux ; Coup de pouce chauffage (5 000 €) ; éco-prêt à taux zéro (jusqu'à 30 000 €)

GÉOTHERMIE DE SURFACE

Une réserve de chaleur sous nos pieds

Le chauffage, la climatisation et la production d'eau chaude constituent 80 % de la consommation d'énergie du secteur résidentiel. Or, pour couvrir ces besoins, 75 % des foyers recourent encore aux énergies fossiles (fioul, gaz). Ces dernières années, la tendance a été au remplacement des chaudières individuelles par des pompes à chaleur air-eau. Pourtant, il existe une solution bien plus efficace, la géothermie de surface. Le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) estime que 98 % du territoire français est éligible à la géothermie de faible profondeur. Il s'agit d'exploiter la chaleur emmagasinée dans les premiers mètres du sol ou dans les nappes d'eau. La température n'y dépasse pas les 30 °C, mais elle est très stable ; c'est une énergie très compétitive, locale et inépuisable. Le principe consiste à capter les calories accumulées dans le sol par un fluide caloporteur qui va produire une vapeur pressurisée, laquelle sera distribuée dans les radiateurs du logement. En sens inverse, une pompe à chaleur géothermique

MÉTHANISATION DOMESTIQUE

Une seconde vie pour les biodéchets

Et si vous produisiez du gaz, voire de l'électricité, à partir de vos déchets ? C'est le pari de la méthanisation domestique. Le principe est assez simple : des bactéries font fermenter des déchets organiques dans un milieu privé d'oxygène. On obtient ainsi un biogaz composé de méthane (50 à 70 %) et de CO_2 (30 à 50 %), ainsi qu'un résidu liquide, le digestat, qui fait un excellent compost, utilisable comme engrais. Il faut pour ce faire s'équiper d'un micro-méthaniseur, constitué de deux gros cylindres et d'un groupe électrogène.

Le premier cylindre est doté d'un broyeur, d'un entonnoir et d'une cuve de vidange dans laquelle seront stockés les déchets. Une fois fermentés, ceux-ci sont acheminés vers le second cylindre, équipé d'un dispositif de sécurité relié aux éléments électrogènes ainsi que d'un réservoir pour stocker le biogaz produit. Celui-ci peut être utilisé pour la cuisson, le chauffage, la production d'eau chaude, ou encore être converti en électricité.

En continu, ce système peut alimenter un groupe électrogène de 1,2 à 1,8 kW, mais il nécessite 4 à 5 mètres carrés d'espace libre dans le jardin pour être installé.

Au cœur de cette démarche : apprendre à bien trier et valoriser ses déchets. Épluchures, graisses animales, fumier, tontes et coupes végétales peuvent être exploités. Le méthaniseur doit être surveillé quotidiennement, sans quoi les bactéries peuvent mourir, et son efficacité dépend de la chaleur ambiante. Mais l'effort en vaut la chandelle, car alimenter régulièrement l'appareil en déchets permet de faire des économies importantes sur la facture mensuelle d'électricité et de gaz. Son usage est d'autant plus vertueux qu'il réduit le pourcentage de méthane, un gaz à effet de serre, rejeté dans l'atmosphère, et ne crée aucune pollution. Les prix d'installation varient en fonction de plusieurs critères : l'utilisation (chauffage, éclairage, eau chaude, électricité), l'installation d'un abri selon la température moyenne de la région, et le modèle (simple ou hybride, couplé à des panneaux solaires). Le digesteur gonflable de la start-up HomeBiogas, qui transforme 2 kg de déchets en 2 heures de consommation de gaz, coûte 600 euros, mais il ne produit pas d'électricité.

Le modèle hybride de SCTD Industries, quant à lui, coûte 20 000 euros.

SCTD INDUSTRIES

Chaque Français produit 83 kg de biodéchets par an… à déverser, si possible, dans un méthaniseur.

PRIX D'ACHAT ET D'INSTALLATION
De 600 à 20 000 €

DÉCHETS
De 500 g à 2 kg par jour sont nécessaires pour un fonctionnement optimal

RENDEMENT
200 m³ de méthane par an et par personne, soit potentiellement 1200 kWh d'électricité ou 4800 kWh pour une famille de quatre personnes

AIDES
Éco-prêt à taux 0 sans conditions de ressources ; TVA à 5,5 % pour une rénovation énergétique ; MaPrimeRénov' accordée pour un méthanisateur hybride solaire

réversible peut rafraîchir un logement en captant la chaleur pour l'évacuer vers le sous-sol. Plusieurs méthodes permettent cette captation. La moins onéreuse et la plus employée repose sur des capteurs horizontaux qui ne nécessitent pas de forage, mais un espace important – chauffer 100 mètres carrés requiert de couvrir le double de surface. Des tubes serpentent sous le sol à une profondeur d'environ 50 centimètres. Pour les immeubles ou les entreprises, on préfère les capteurs verticaux : des sondes qui plongent dans le sol à une profondeur de 30 à 100 mètres. Les rendements sont meilleurs, mais le coût des forages est plus élevé. Les pompes à chaleur géothermiques consomment 30 % d'électricité en moins que leurs homologues à air et ont une durée de vie plus longue (jusqu'à trente ans), représentant donc une solution très intéressante pour la construction de bâtiments neufs ou la rénovation. Il existe quatre modèles de pompes, dont le choix dépend surtout de l'espace disponible à l'extérieur du bâtiment concerné. Le Syndicat des énergies renouvelables (SER) a publié, en janvier, un guide qui détaille les avantages et les différentes options de la géothermie.

GETTY IMAGES

Le captage horizontal convient à des terrains plats ou peu pentus, et bénéficiant d'un bon ensoleillement.

Économies d'énergie : les bons gestes pour réduire sa facture

Électricité, gaz, carburants… Les prix de l'énergie ne cessent d'augmenter et les factures s'alourdissent. Comment dès lors réduire sa consommation ? En privilégiant la sobriété et des équipements performants. Et en entamant, si nécessaire, des travaux de rénovation, qui peuvent être en partie financés par l'État.

3 551 €
par ménage en 2023, soit 9,5 % du budget global moyen. Dépense annuelle moyenne consacrée à l'énergie en France, pour le logement et les transports.

APPAREILS LES PLUS ÉNERGIVORES
(en KWh/an) source : Ademe/Elecdom

SOBRIÉTÉ

10 écogestes simples et efficaces

Chauffer les pièces occupées à 19 °C (22 °C dans la salle d'eau) et 17 °C la nuit. Une baisse de 1 °C → **7 % d'économie de chauffage**

Installer un thermostat programmable (obligatoire à partir du 1er janvier 2027) → **jusqu'à 15 % d'économie**

Maintenir le taux d'humidité entre 40 % et 60 %

Fermer les volets la nuit permet de diminuer de 60% la déperdition de chaleur par les fenêtres

Entretenir chaque année sa chaudière → **10% d'économies**

Fermer les robinets mitigeurs en position froide pour ne pas solliciter la chaudière inutilement

Calorifuger les circuits de chauffage et d'eau chaude → **10 % d'économies**

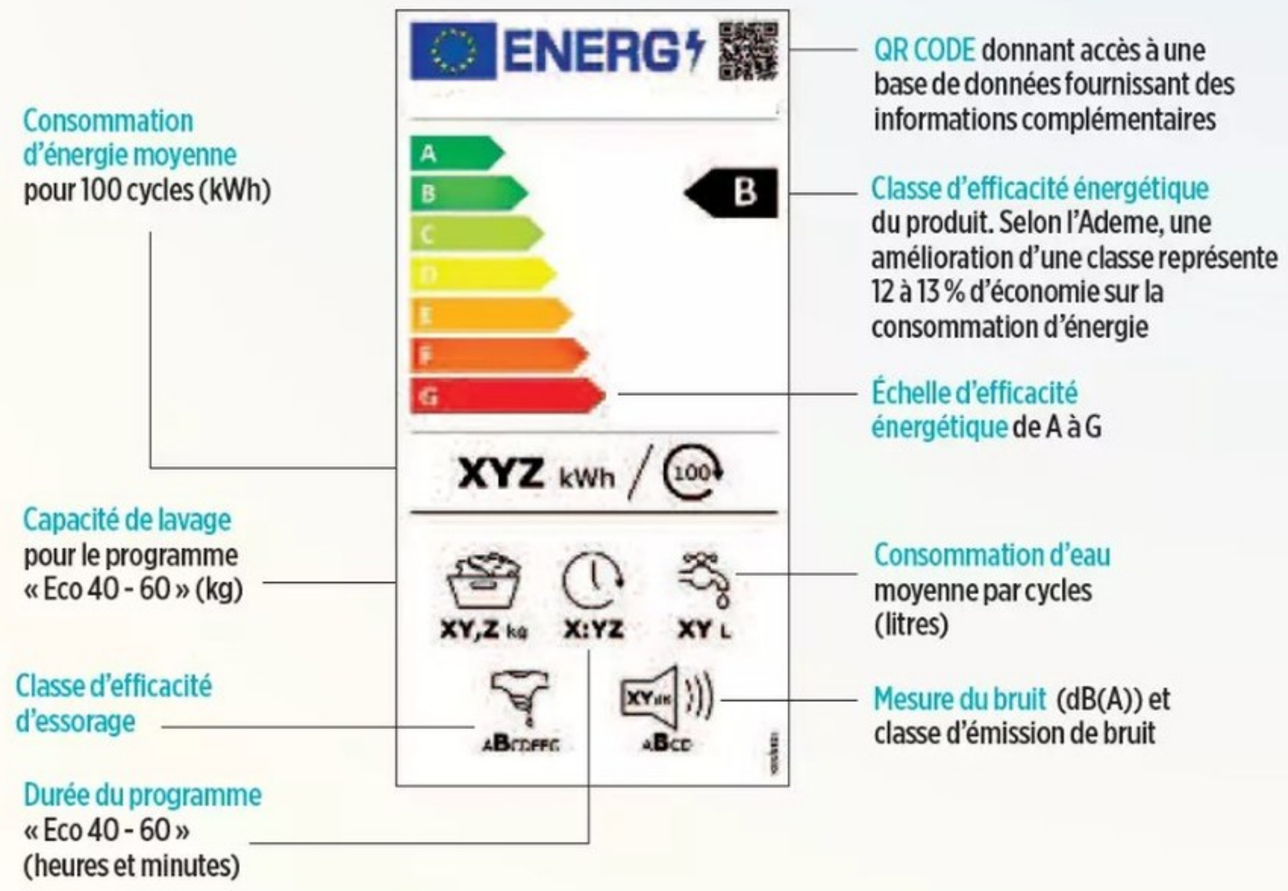
Régler le chauffe-eau à 50 °C et le programmer en heures creuses ; le couper en cas d'absence

Éteindre tous les appareils en veille → **jusqu'à 5 % d'économies**

Laver le linge à 30 °C (**3 fois moins d'énergie** qu'à 90 °C), et la vaisselle en mode « éco » (**45 % d'économie** par rapport à un programme intensif)

Se fier à l'étiquette énergie

L'étiquette énergie est un outil indispensable pour choisir les équipements les moins énergivores et les plus adaptés à ses besoins. Un appareil bien classé représente en effet des économies en électricité, mais aussi en eau et en nuisances sonores. Depuis mars 2021, la nouvelle étiquette énergie rééchelonne de A à G la classification de cinq groupes d'appareils : ampoules et LED, lave-vaisselle, lave-linge *(voir ci-contre)*, réfrigérateurs, congélateurs et caves à vin, téléviseurs et écrans. Pour ces produits désormais plus performants, la nouvelle classification est plus exigeante. Selon l'Ademe, choisir un réfrigérateur de classe C plutôt que de classe F permet de réaliser 50 % d'économies d'énergie, soit 130 kWh/an. L'ancienne étiquette (de A+++ à D) reste toutefois valable pour les hottes, les fours, les sèche-linge, le chauffage et la climatisation.



Pages réalisées par Sara de Lacerda
Infographies : Bruno Bourgeois

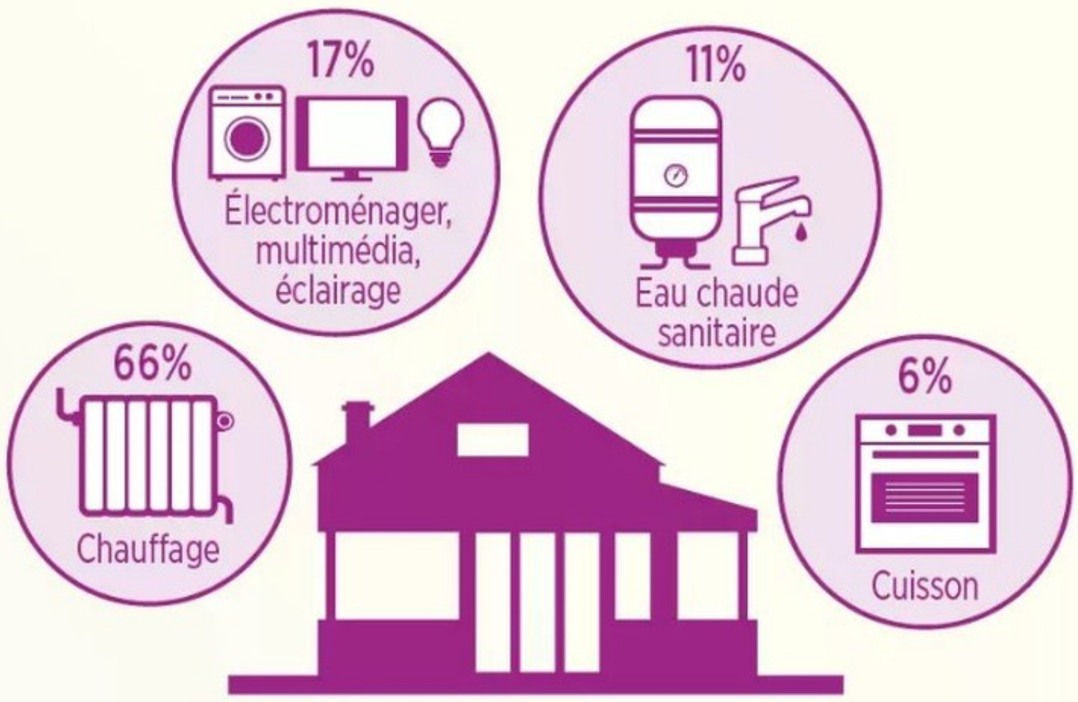
RÉNOVATION

Chauffer moins, chauffer mieux

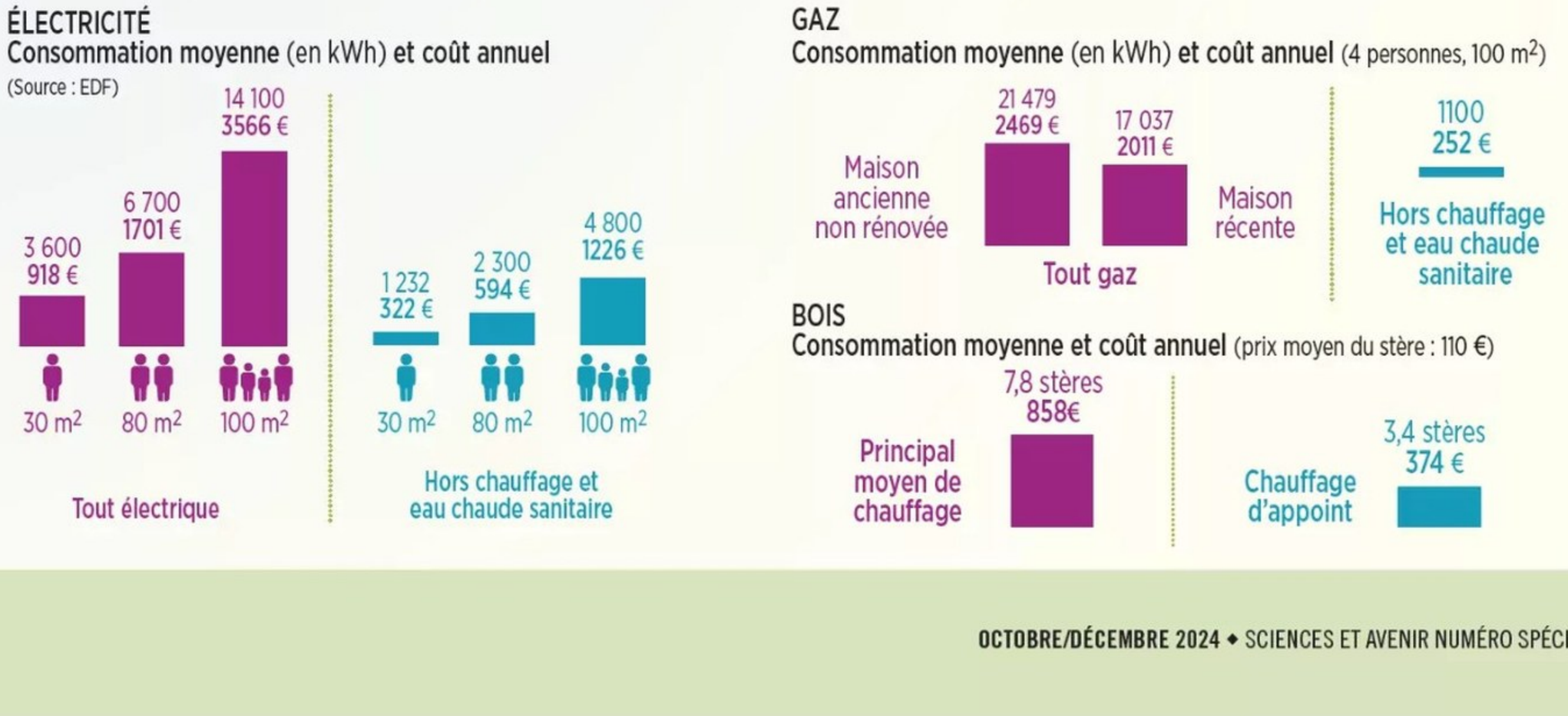
Le chauffage et la production d'eau chaude représentent les trois quarts de la consommation d'énergie d'un foyer (hors carburant). Si l'on veut faire des économies, c'est donc sur ce poste qu'il faut jouer, éventuellement en changeant son équipement, mais, dans ce cas, uniquement après s'être assuré que le logement est bien isolé. Chaudière au gaz ou électrique, pompe à chaleur, panneaux solaires, le choix est vaste, chaque appareil présentant des atouts et des inconvénients que l'on ne peut jauger qu'en fonction de la configuration de son logement et de ses propres besoins. On peut s'appuyer sur deux critères pour repérer un appareil efficace : l'étiquette énergie et le rendement sur énergie primaire, qui exprime le rapport de l'énergie produite sur l'énergie consommée. Il permet de confirmer que les radiateurs électriques sont les moins performants des systèmes de chauffage (avec un rendement de 38 % au maximum), tandis que tous les types de pompes à chaleur dépassent les 110 % en saison de chauffe (avec un rendement de 190 % pour les modèles géothermiques). On peut aussi se contenter de changer de chaudière, les modèles récents (chaudière gaz ou pompe à chaleur) ayant un meilleur rendement car ils font circuler de l'eau à basse, et non plus à haute, température. Et pour faire des économies supplémentaires, éviter de chauffer pour rien des espaces non occupés en choisissant les pièces, les moments de la journée et la température voulue grâce à des thermostats programmables.

Les très énergivores climatiseurs mobiles

Pour ce qui est de la production d'eau chaude, l'Ademe recommande tout simplement de choisir en premier lieu un équipement adapté à sa consommation – 30 % des chauffe-eau actuellement installés sont surdimensionnés. Comme pour le chauffage, ce sont les systèmes alimentés par des énergies renouvelables (chauffe-eau thermodynamique fonctionnant avec une pompe à chaleur ou chauffe-eau solaire) qui ont le meilleur rendement.
Lorsque les équipements sont performants, il n'est plus besoin d'appareils d'appoint, peu efficaces et très coûteux : radiateurs électriques, ou, pire, à combustible, qui sont émetteurs de gaz toxiques.
On évite aussi les climatiseurs mobiles très consommateurs d'énergie et on adopte les bons gestes dès que possible : faire circuler l'air frais la nuit, et fermer fenêtres, volets et stores pendant les chaudes journées. Si l'on a vraiment besoin de s'équiper d'un climatiseur, le système le moins coûteux (y compris en travaux) est le ventilateur fixé au plafond, qui permet d'abaisser la température de 2 à 3 °C dans une pièce. Sinon, il faut opter pour une climatisation ou une pompe à chaleur réversible classée A+++ et dotée d'un coefficient d'efficacité frigorifique (EER) élevé.
Une fois la climatisation installée, on évite d'y recourir systématiquement, non seulement pour épargner sa facture, mais aussi parce qu'elle réchauffe l'air extérieur et émet du CO_2. En outre, la réglementation indique que la température de climatisation d'un logement ne doit pas être inférieure à 26 °C.



CONSOMMATION MOYENNE D'ÉNERGIE DANS LE LOGEMENT
répartition par usage hors carburant
SOURCE : MINIISTÈRE DA LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE, 2022



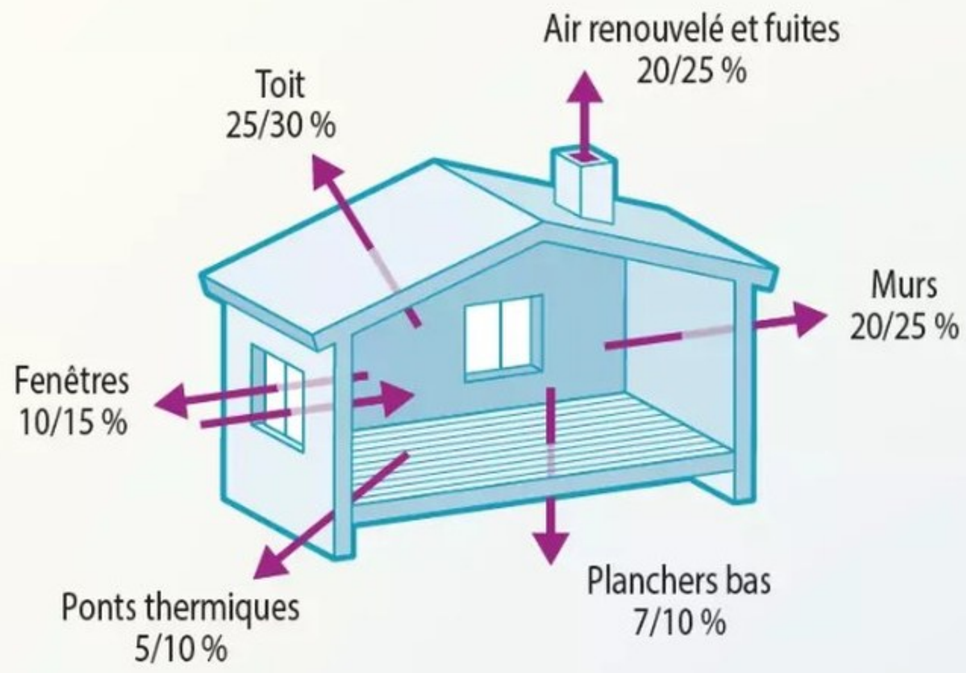
RÉNOVATION

Bien isoler sa maison… du sol au plafond

Vous êtes propriétaire d'une passoire énergétique ou d'un logement classé E ? Il est temps de penser à le rénover et de se lancer dans des travaux qui le rendront plus sain tout en vous garantissant des économies d'énergie. L'isolation thermique vise en effet à supprimer l'effet de paroi froide qui diminue le réchauffement des pièces et favorise la condensation. Dans une pièce mal isolée, l'humidité modifie non seulement le ressenti thermique, mais elle peut aussi dégrader les murs, générer l'apparition de moisissures… et vous rendre malade ! Par ailleurs, l'isolation va permettre de minimiser les déperditions de chaleur générées par toutes les ouvertures sur l'extérieur (toit, murs, fenêtres, planchers bas, cheminées…) et garantir une température homogène dans toutes les pièces. Pour cela, l'enveloppe du bâti doit être la plus étanche possible – ce qui demande de supprimer les ponts thermiques aux jointures – tout en le laissant « respirer », c'est-à-dire en le ventilant correctement.

Avant de choisir le matériau adapté aux travaux d'isolation et d'en calculer l'épaisseur nécessaire, il faut avoir déterminé quels éléments du bâti sont concernés, et si l'installation se fera par l'extérieur ou par l'intérieur. Plusieurs critères doivent également être pris en compte pour déterminer la qualité de l'isolant, définie par cinq indicateurs :

- Le coefficient de conductivité thermique (λ), qui indique la capacité du matériau isolant à conduire la chaleur.
- La résistance thermique (R), qui correspond au rapport de l'épaisseur du matériau isolant sur sa conductivité thermique et définit sa capacité à ralentir le transfert de chaleur.

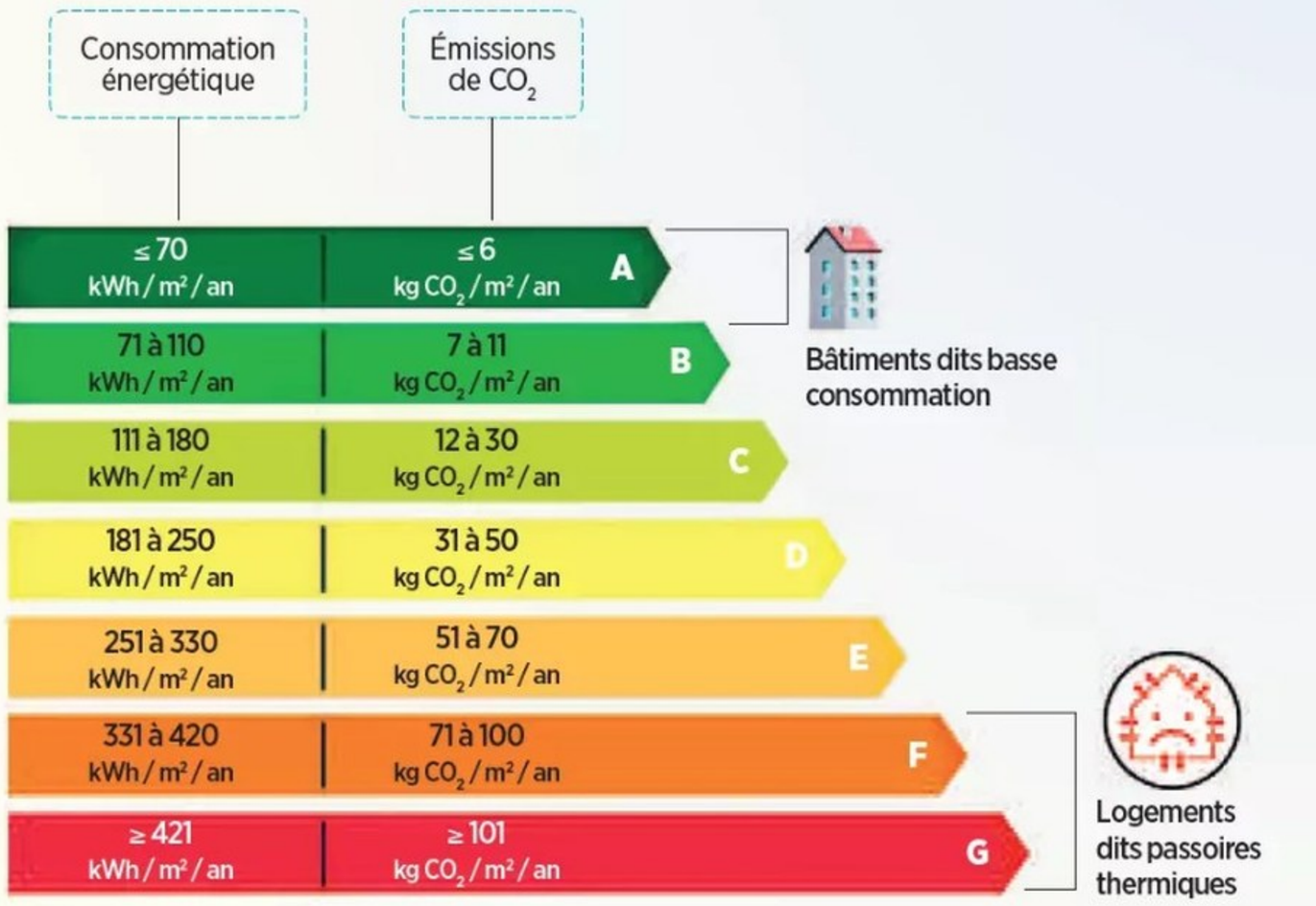


PERTES DE CHALEUR D'UNE MAISON CONSTRUITE AVANT 1974 ET NON ISOLÉE

Les passoires thermiques dans le viseur

Les travaux d'isolation sont devenus d'autant plus importants depuis le 1er juillet 2021, date à laquelle le diagnostic de performance énergétique (DPE) a été reformulé afin d'accélérer l'identification et la rénovation des passoires énergétiques (17 % du parc immobilier français, soit 5,2 m de logements). Le DPE, qui indique sur une échelle de A à G la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre d'un logement ou d'un bâtiment, doit désormais être réalisé, par le propriétaire, avant toute vente ou toute signature d'un contrat de location.

Depuis le 1er janvier 2023, les logements consommant plus de 450 kWh/m2/an sont considérés comme indécents et se trouvent hors DPE. Ce critère de décence vise à exclure progressivement du marché locatif ou à geler les loyers des logements classés G dès 2025, classés F à partir de 2028, et classés E en 2034.



L'étiquette énergie du DPE comporte 7 classes : de G (classe la moins performante, en rouge) à A (classe la plus performante, en vert foncé). Pour les classes F et G, un pictogramme supplémentaire alerte sur le fait qu'il s'agit d'une « passoire énergétique ».

▶ Le coefficient de transmission thermique (U), qui traduit la performance des parois, fenêtres, portes, etc. composées de plusieurs matériaux.
▶ Le facteur de transmission solaire (Sw), qui note la proportion d'énergie solaire transmise à travers une paroi vitrée (vitrage + menuiserie).
▶ Le coefficient de transmission lumineuse (Tlw), qui exprime la capacité de la paroi vitrée à transmettre la lumière naturelle à l'intérieur du bâtiment.

Le choix des matériaux est large et également question de conviction écologique, puisque l'on trouve aussi bien des isolants synthétiques issus de la pétrochimie (polystyrène expansé ou extrudé, polyuréthane), des isolants minéraux (laine de verre ou de roche, verre cellulaire), que des matériaux biosourcés d'origine végétale (laine de bois, de chanvre, de lin, liège, paille…), animale (laine de mouton, plumes d'oie…) ou recyclés (ouate de cellulose, fibres de textile).

Supprimer un maximum de ponts thermiques

On commence par le toit, car c'est la partie du bâti dont l'isolation va générer le plus d'économies. Attention, toutefois, car l'intervention d'un professionnel est obligatoire. Plusieurs possibilités se présentent. Si les combles ne sont pas aménagés, il suffit d'en isoler le plancher ; dans le cas contraire, on peut isoler par l'intérieur au niveau de la charpente, ou bien par l'extérieur en ôtant le revêtement de la toiture. Pour ce qui est des murs, une isolation par l'extérieur (panneaux isolants + treillis collé + enduit) aura pour avantage de mieux les protéger, de supprimer un grand nombre de ponts thermiques et de ne pas réduire la surface habitable. Il est cependant plus économique encore d'isoler les murs par l'intérieur, en collant des panneaux directement sur le mur, en les vissant sur une ossature, ou bien en projetant un enduit isolant. Mais cette méthode ne permet pas de supprimer tous les ponts thermiques. Pour les fenêtres, l'isolation consiste essentiellement à remplacer le simple vitrage par un double, voire triple vitrage. Ce dernier conserve mieux la chaleur, mais il est plus cher, demande des travaux plus lourds, et filtre davantage la lumière du soleil.

AIDES

Vérifiez votre éligibilité

Différents dispositifs ont été mis en place, notamment dans le cadre de France Renov' (service public de la rénovation de l'habitat), qui répertorie également les entreprises agréées.

▶ **https://france-renov.gouv.fr**

Les aides financières de l'Agence nationale de l'habitat (Anah) (MaPrimeRénov', Ma Prime Logement décent, Loc'Avantages, etc.)

▶ **www.maprimerenov.gouv.fr**
▶ **https://sciav.fr/aidesanah**
▶ **https://www.anah.gouv.fr/action/aides**

Des aides des fournisseurs d'énergie

▶ **https://sciav.fr/coupdepoucechauffage**
▶ **https://sciav.fr/coupdepoucerenovation**
▶ **https://sciav.fr/coupdepoucecovoiturage**

Le chèque énergie (en fonction des revenus)

▶ **www.chequeenergie.gouv.fr**

La prime énergie d'EDF (isolation, chauffage, menuiserie)

▶ **www.prime-energie-edf.fr/**

L'éco-prêt à taux zéro

▶ **https://sciav.fr/ecoptz**

Le prêt Action logement (travaux d'amélioration de la performance énergétique)

▶ **https://sciav.fr/prettravaux**

Le prêt à l'amélioration de l'habitat de la CAF

▶ **https://sciav.fr/pretcaf**

Le prêt avance rénovation (prêt auprès de la banque)

▶ **https://sciav.fr/avancerenovation**
▶ **https://sciav.fr/anilavance**

Le prêt Développement durable (à demander auprès de sa banque)

Aides des collectivités locales

▶ **https://sciav.fr/collectivites**

La TVA réduite à 5,5 %

▶ **https://sciav.fr/tvareduite**

En savoir plus :

▶ **https://sciav.fr/ademerenovation**

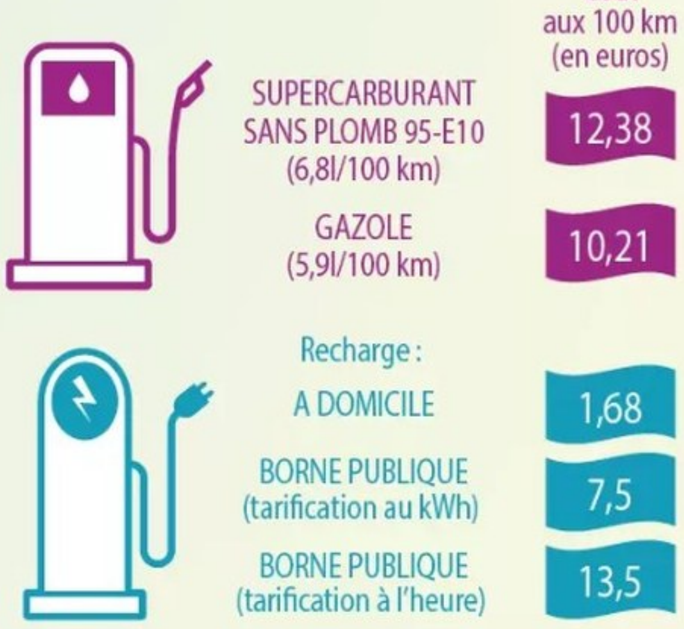
Les aides pour les véhicules

▶ **https://sciav.fr/bonus**
▶ **https://sciav.fr/acquisition**
▶ **https://sciav.fr/installationborne**

TRANSPORTS

1 Privilégier l'écoconduite

▶ Réduire sa vitesse
▶ Adopter une conduite souple, sans à-coups, équivaut une économie de 40 % par rapport à une conduite agressive
▶ Couper le moteur lors d'un arrêt prolongé
▶ Vérifier la bonne pression des pneus (+ 1,2 % de consommation pour un sous-gonflage de 0,3 bar / + 2,4 % pour 0,5 bar)
▶ Choisir des pneus basse consommation (économie de 5 % de carburant)
▶ Ne pas abuser de la climatisation (jusqu'à 7 % de consommation supplémentaire)



La recharge d'un véhicule électrique chez soi est bien plus économique qu'un plein d'essence. Attention : d'une borne publique à l'autre, les paramètres de tarification varient et peuvent réserver des surprises.

2 Diviser les frais

Comment économiser sur les transports lorsque ni la marche à pied ni le vélo ne sont envisageables, et les transports en commun trop éloignés ou trop rares ? En divisant son budget entre voisins ou collègues grâce au covoiturage, ou bien en louant un véhicule uniquement pour les déplacements nécessaires. Sinon, l'option la plus avantageuse sur le long terme est le passage à la voiture électrique.

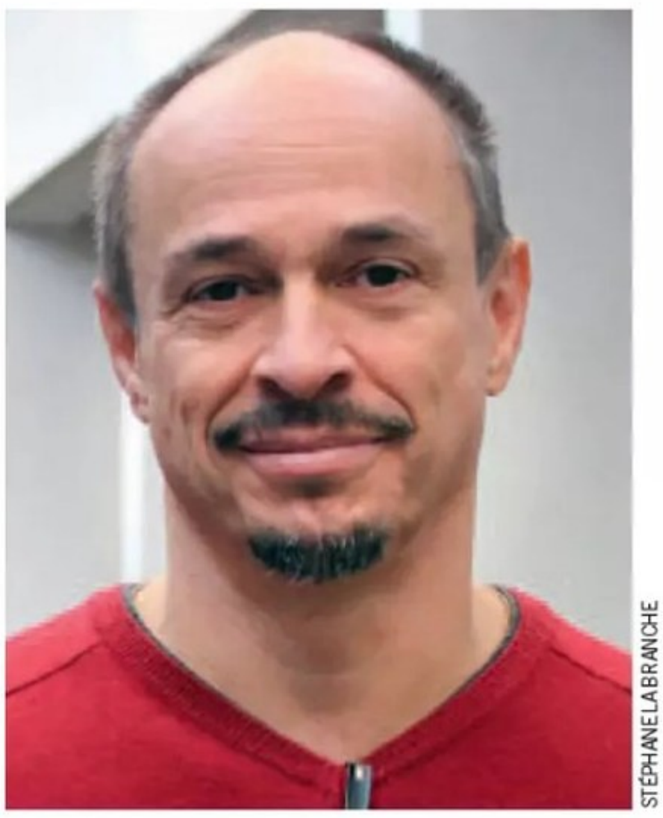
STÉPHANE LA BRANCHE

Sociologue du climat, coordinateur scientifique du Groupe international d'experts sur les changements de comportement

« Réduire sa facture, la première motivation de sobriété énergétique »

De l'écophile au récalcitrant, le sociologue a identifié sept profils en matière de consommation énergétique. Connaître ces comportements est indispensable pour élaborer des politiques publiques efficaces et acceptées.

L'écologie est-elle la motivation première pour diminuer sa consommation énergétique ?
J'ai pu repérer sept profils types de comportements chez les consommateurs. Parmi eux, seul l'écophile (20 % de la population) s'intéresse à l'énergie parce qu'elle représente un problème écologique, et aura à cœur de changer ses pratiques. Pour les six autres profils, l'écologie est surtout mobilisée pour requalifier ou justifier des conduites. La première motivation est de réduire sa facture. En second plan, c'est un plus « si c'est bon pour l'environnement ». C'est notamment le cas pour l'économe (37 %).



STÉPHANE LABRANCHE

Et les autres ?
Le technoludique (5 %) aime acquérir de nouvelles technologies, jouer avec des applications, comme la commande à distance de la consommation d'énergie, sans pour autant s'intéresser à l'enjeu énergétique. L'énergiphile (3 %), quant à lui, aura une grande connaissance de l'énergie et jonglera aisément avec les concepts de réseaux et d'équilibre de consommation (kWh, heures creuses, etc.). Pour lui, la réduction de la consommation importe plus que celle du budget ou de l'empreinte écologique. C'est une question d'optimisation.

Pour d'autres, ni la sobriété ni les économies ne sont des moteurs de changement ?
En effet, il y a trois autres profils. L'impuissant (12 %) est préoccupé par l'énergie, mais pense ne pas pouvoir faire autrement. L'indifférent (8 %) ne se soucie pas de sa facture, persuadé que, quoi qu'il fasse, elle ne changera pas. Et finalement, le récalcitrant (15 %) est convaincu que ce sont aux décideurs et au monde économique de faire des efforts ; et il ne supporte pas ce qu'il considère comme des injonctions à « se serrer la ceinture ». Il faut bien dire que la sobriété énergétique ne va pas de soi ! Elle nécessite une volonté de changer assortie d'une connaissance de ses propres comportements.

C'est pour cette raison que nous ne modifions pas nos « comportements énergétiques », alors que nous savons bien qu'il le faudrait ?
Souvent, on invoque l'inconfort physique – le désagrément d'avoir trop froid en hiver, trop chaud en été… Mais l'inconfort cognitif est bien plus important ! L'injonction à changer provoque une surcharge cognitive. Et le cerveau est fainéant… Au-delà des sept profils, on observe trois types de réactions : le déni lié à l'angoisse, renforcé par la diffusion de messages catastrophistes sur le climat ; l'attitude ludique de celui qui va se challenger face à l'objectif à atteindre ; et la stratégie : 60 % des individus vont agir en fonction de l'ensemble des paramètres objectifs et subjectifs à leur disposition.
Par ailleurs, faire un effort sera plus aisé si l'on trouve des co-bénéfices de confort. Si un individu, suite à une panne, est forcé de prendre les transports en commun, il se pourrait qu'il les apprécie, finalement, car il aura enfin le temps de lire…

Pourquoi est-il important de connaître ces profils ?
Appréhender les véritables motivations, rationnelles ou non, qui induisent les comportements est indispensable à la mise en œuvre de politiques publiques efficaces. Marteler des injonctions culpabilisantes est improductif. Il faut faciliter l'accompagnement au changement. Les politiques de mobilité urbaine sont plutôt avancées sur ce sujet. Par exemple, dans certaines villes, lorsqu'on réduit le nombre de places de stationnement, on les remplace par des terrasses de restaurant. Les co-bénéfices non climatiques sont souvent plus convaincants !
Si l'on ne parle que de la catastrophe à venir, on plongera la majeure partie des gens dans le déni. Mieux vaut encourager, diffuser des messages positifs. Et offrir des exemples de solutions concrètes, insérées dans le quotidien, plutôt que des grands principes généraux.

PROPOS RECUEILLIS PAR VALÉRIE HANDWEILER

e-book ***Énergie et écologie : les 7 profils socio-énergétiques***, PUG, 2021, sciav.fr/profilsénergétiques

Japon | EXPO 2025

INCONTOURNABLE !

CROISIÈRE DE TOKYO A HONG KONG AVEC L'EXPOSITION UNIVERSELLE D'OSAKA

Le Japon, ses temples, ses geishas, le mont Fuji et... en 2025, **son exposition universelle à Osaka.** Sciences et Avenir – La Recherche ne pouvait pas manquer cette occasion d'inviter ses lecteurs – et beaucoup d'autres - à une croisière permettant à la fois de découvrir l'extraordinaire ville impériale de Tokyo, mais aussi de voguer le long des côtes de l'archipel, avant de mettre le cap vers la Chine.

Un voyage particulièrement remarquable proposé à bord du Regatta, un bateau luxueux et à taille humaine (333 cabines), dont les multiples escales ont de quoi faire rêver et réfléchir.

Osaka, Hiroshima (où l'on visitera le mémorial de la Paix), **Nagasaki, Shanghai** (où l'on restera pendant deux jours), **Hong Kong. Osaka** sera l'occasion unique de découvrir l'événement mondial réunissant 160 pays que constitue **l'exposition universelle.**

« Concevoir le futur, imaginer notre vie de demain », tel est son thème, particulièrement évocateur pour Sciences et Avenir – La Recherche et tous ceux qui se passionnent pour l'évolution actuelle de l'Asie.

En avant pour le pays du Soleil Levant !

Dominique LEGLU

NOS SCIENTIFIQUES, SPÉCIALISTES ÉMINENTS, PRÉSENTS (2) AVEC VOUS À BORD

Dr Dominique Leglu
Directrice éditoriale de Sciences et Avenir – La Recherche, pôle Sciences du groupe Challenges.

Dr Francis Rocard
Astrophysicien, responsable du programme d'exploration du système solaire au CNES.

Mme Jozée Sarrazin
Spécialiste de l'Océan et des milieux sous-marins responsable du laboratoire environnement profond à l'Institut Français **Ifremer**.

A BORD DU LUXUEUX MS REGATTA *****
DU 20 MAI AU 03 JUIN 2025

15 JOURS / 14 NUITS
A PARTIR DE **7 390 €/PERSONNE** AU DÉPART DE PARIS
VOTRE PROGRAMME EN TOUT INCLUS (1)

UN ÉVÈNEMENT EXCLUSIF

MYCOMM.

Retrouvez tous les détails de ce voyage exceptionnel sur www.sa-japon.fr
Renseignements | Tél. 01 84 76 22 35 | experiences@mycomm.fr

(1) Voir détails sur la brochure (2) Sous réserve de disponibilité

SARL Mycomm - 40 avenue Raspail - 94250 Gentilly • Immatriculation Atout France IM094100035 • Assurances Professionnelles by Hiscox - Tourisme Pro n° RCE1006 et n° RC1006-PJ0116 • Agence garantie par l'APST • RCS 510 368 400

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

Graph. Atelier Pascale M (26)- Montage photos : Torii - Takeshi Yu Unsplash - Volcan Fuji Freepik - Océania Cruises

assystem

REJOIGNEZ LES SWITCHERS

ASSYSTEM RECRUTE 2 500 NOUVEAUX COLLABORATEURS PAR AN EN FRANCE ET À L'INTERNATIONAL

Postulez ici :

Rejoignez la communauté des Switchers et contribuez à accélérer la transition énergétique !

Engagez vous dans la lutte contre le changement climatique !

40%

C'est la part des émissions mondiales de CO2 attribuée à la production d'électricité.

Face à l'urgence climatique, il est donc indispensable de réduire l'empreinte de ce secteur le plus rapidement possible.

Et pour y arriver, le nucléaire et les énergies renouvelables sont nos meilleurs alliés !

Chez Assystem, on s'est donné pour mission d'accélerer la transition énergétique partout dans le monde.

En France, en Europe, au Moyen-Orient ou en Asie centrale, 7 500 Switchers, (les collaborateurs d'Assystem) utilisent leurs compétences en ingénierie, en management de projet et en digital pour faire de la transition énergétique une réalité. Les projets dans le nucléaire, les renouvelables (éolien et solaire), les réseaux électriques ou l'hydrogène sont de plus en plus nombreux.

Et pour y contribuer, Assystem recrute 2 500 personnes par an !
Rejoindre Assystem c'est :

- L'assurance de ne jamais s'ennuyer grâce à la variété de nos métiers et de nos projets.
- La possibilité de booster votre carrière grâce à une politique de mobilité et de formation ambitieuse.
- Se sentir bien au quotidien : entraide, esprit d'équipe, télétravail...

C'est le moment de switcher !